

Das Ermitteln von Lawinengeschwindigkeiten

Bernhard Zenke

*Diss
München
1907*

Das Ermitteln von
Lawinengeschwindigkeiten



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Das Ermitteln von Lawinengeschwindigkeiten

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

von
Bernhard Zenke

München 1984

Das Ermitteln von Lawinengeschwindigkeiten

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Tag der Promotion : 15.02.1984

Berichterstatter : Prof.Dr. K.E. Rehfuess
Prof.Dr. F. Franz
Prof.Dr. H. Körner

Anschrift des Verfassers: Bernhard Zenke
Ostermannweg 13
D-8110 Murnau

Vorwort

Die Forschungsarbeiten begannen mit einer stark forstlich orientierten Zielsetzung. Es sollte in einem Hochgebirgsareal in den Bayerischen Alpen gezeigt werden, wie die zunehmende Verlichtung unserer Bergwälder das Entstehen von Lawinenbahnen begünstigt, wieweit auf diesen Bahnen mögliche Lawinen in die Talbereiche vordringen können und welche Gefahrensituationen sich daraus ergeben.

Die Frage nach der Reichweite möglicher Lawinen auf bislang noch waldbestockten Hängen war jedoch mit den vorliegenden Erkenntnissen über die Bewegung von Lawinen nicht befriedigend zu beantworten. Deshalb stellte ich die forstlichen Gesichtspunkte zunächst etwas in den Hintergrund und beschäftigte mich verstärkt mit grundlegenden Fragen zur Reichweiten- und Geschwindigkeitsermittlung von Lawinen.

Ich danke Herrn Prof. Dr. K.E. Rehfuess, daß er mir die Möglichkeit gab, dieses am Rande der Bodenkunde stehende Projekt durchzuführen. Er beobachtete die Untersuchungen mit großem Interesse und gewährte mir seine volle Unterstützung.

Zu tiefem Dank bin ich Herrn Prof. Dr. W. Laatsch verpflichtet, der mir stets mit Ratschlägen und Hinweisen zur Seite stand. Er förderte mit kritischem Interesse die Forschungsarbeiten und gab mir in einer Vielzahl gewinnbringender Diskussionen wertvolle Anregungen.

Die Erforschung niedergegangener und niedergehender Lawinen ist ohne die Mithilfe vieler Personen und Institutionen nicht möglich. Ihnen allen gilt mein Dank.

Persönlichen Dank möchte ich den Mitarbeitern der Bayerischen Lawinenwarnzentrale aussprechen, insbesondere Herrn Reg.Dir. H.E. Deisenhofer, Herrn ORR R. Christa und Herrn E. Liebl. Sie stellten mir wichtige Arbeitsunterlagen zur Verfügung.

Für die vielfältige Unterstützung der Geländearbeiten bedanke ich mich bei den Betriebsleitungen und Mitarbeitern der Tegelbergbahn in Schwangau, der Brauneckbergbahn in Lenggries, der Wendelsteinbahn in Brannenberg und der Rauschbergbahn in Ruhpolding.

Herrn Math und Herrn Dorn verdanke ich die Meßmöglichkeiten bei Lawinensprengungen im Oberstdorfer Raum.

Herr Dipl.Ing.(FH) E. Krahmer entwickelte und baute mein Meßgerät und gab mir darüber hinaus wertvolle Hinweise zur Meßtechnik.

Herr FOR Meyer stand mir häufig als Gesprächspartner zur Verfügung, um EDV- und auswertetechnische Fragen zu diskutieren.

Herzlich danken möchte ich Herrn Dipl.Forstw. M. Hildebrandt für die Mitarbeit bei den Geländearbeiten und für die Durchsicht des Manuskripts.

Ebenso danke ich Frl. B. Gabriel. Sie sprang bei den Geländearbeiten stets ein, wenn Not am Mann war. Darüber hinaus half sie mir beim Anfertigen der Reinschrift.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanzierte die Forschungsarbeiten. Die Bayerische Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalt übernahm die anfallenden EDV-Kosten. Beiden Institutionen sei verbindlichst gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung	1
2	Der Begriff der Lawinengeschwindigkeit	5
2.1	Die Geschwindigkeit der Lawine	5
2.2	Die Geschwindigkeiten einzelner Teilchen der Lawine ...	8
2.3	Die Geschwindigkeiten von Massenteilen der Lawine	11
2.4	Die Geschwindigkeit der Lawinenfront	13
2.5	Die Aussagekraft der meßbaren Geschwindigkeiten	18
3	Meßverfahren zum Ermitteln der Geschwindigkeiten von Lawinen	19
3.1	Pauschale Laufzeitmessungen	19
3.2	Abschnittsweise durchgeführte Laufzeitmessungen	23
3.2.1	Meßtheoretische Überlegungen	23
3.2.2	Stoppuhrmessungen	25
3.2.3	Messungen mit der Filmkamera	33
3.2.4	Messungen über terrestrische Photogrammetrie	39
3.2.5	Messungen mit automatischer Steuerung der Zeitnahme ...	42
3.3	Messungen an einzelnen Bahnpunkten	46
3.3.1	Strömungsgeschwindigkeitsmessungen	46
3.3.2	Geschwindigkeitsabschätzung aus Druckmessungen	47
3.4	Kontinuierlich fortschreitende Geschwindigkeitsmessungen	50
3.4.1	Radarmessungen	50
3.4.2	Kontrollierte Filmaufzeichnung der Frontbewegung	53
3.4.2.1	Grundsätzliche Überlegungen zum selbstentwickelten Meßverfahren	53
3.4.2.2	Das Meßprinzip	54
3.4.2.3	Die Meßapparatur	59
3.4.2.4	Die Durchführung der Messung	62
3.4.2.5	Das Übertragen und Aufbereiten der Daten	64
3.4.2.5.1	Übertragung der Daten auf die Großrechenanlage ...	64
3.4.2.5.2	Datenüberprüfung und -umwandlung	64
3.4.2.5.3	Überprüfung der Kameraführung und Meßwerte- korrektur	66
3.4.2.6	Die datenmäßige Erfassung des Lawinenstrichs	71
3.4.2.6.1	Kartenauswertung	71

	Seite
3.4.2.62	Geländevermessung 72
3.4.2.63	Tabellarische Lawenstrichübersicht und Längsprofilzeichnung 73
3.4.2.64	Dreidimensionale Koordinatendarstellung der Lawenstrichpunkte 75
3.4.2.7	Die Ortsbestimmung der gefilmten Lawenfront im Lawenstrich 76
3.4.2.8	Das Berechnen der Lawenfrontgeschwindigkeiten 80
3.4.2.9	Die Glättung der Meßwertreihen 82
3.4.2.10	Das Zeichnen der Geschwindigkeitslinie über dem Lawenstrichlängsprofil 84
4	Rechenverfahren zum Aufbereiten gemessener Geschwindigkeiten
4.1	Ziele der Datenaufbereitung 89
4.2	Meßbeispiel aus der Literatur 89
4.3	Glättung schwankender Geschwindigkeitsverteilungen 94
4.3.1	Gleitende Mittel 94
4.3.2	Splineapproximation 95
4.4	Umwandlung abschnittsweise gemittelter Geschwindigkeiten in stetige Geschwindigkeitsverteilungen 99
4.5	Abschätzen der Geschwindigkeitsverteilung aus Gesamt- laufzeitmessungen 100
4.6	Abschätzen natürlicher Schwankungsbreiten gemessener Geschwindigkeiten 105
5	Ausblick 108
6	Zusammenfassung 110
7	Summary 111
8	Literaturverzeichnis 112
Anhang	
A)	Verzeichnis der verwendeten Rechenprogramme 118
B)	Verzeichnis der Abbildungen 119
C)	Verzeichnis der Tabellen 121

1 Einleitung

Eine Lawine ist ein äußerst kompliziertes Gebilde. Sie kann aus großen, harten Schneeschollen bestehen, die polternd den Hang hinunterrutschen. Lawinen können wie aus einer Cremetube gedrückt engen Geländeeinschnitten folgen oder als Aerosol losgelöst vom Relief des Geländes zu Tal stürzen.

Eine Lawine ist ein System aus einzelnen Eiskristallen, die manchmal zusammengefroren und fest miteinander verbacken sind. Mitunter verbinden Wassermenisken die einzelnen Lawinenpartikel und verleihen dem System dadurch eine gewisse Plastizität. Bisweilen bilden die Kristalle aber auch als freischwebende Teilchen mit der Luft ein lockeres Gemisch.

Unter einem System versteht man in der Physik eine starre oder verformbare Anhäufung von Teilchen bzw. Massenpunkten, die durch irgendwelche Bindungskräfte gekoppelt sind (FRAUENFELDER u. HUBER 1963). Eine Galaxie, aber auch ein Stück Würfelzucker, eine Gewitterwolke oder ein Molekül stellen Systeme dar. Manche Systeme sind sehr einfach aufgebaut, andere sind komplex und vielgestaltig. Dann erschweren sie dem Beobachter das Verständnis der Vorgänge im Inneren des Systems.

Die zu Tal stürzende Lawine ist ein solch komplexes System. Um den Bewegungsablauf einer Lawine auf einem bestimmten Lawinenstrich annähernd erfassen und gegebenenfalls berechnen zu können, benötigt man Modelle. Modelle sind vereinfachende bildliche oder mathematische Darstellungen des untersuchten Systems, die sich auf wesentliche Merkmale und Kenngrößen stützen und unwesentliche Einzelheiten vernachlässigen. Es gibt mathematische und physikalische Modelle. Die mathematischen Modelle können zum Teil auf Zufallsvariablen beruhen. Dann bezeichnet man sie als "stochastische Modelle". Stützen sich die Modelle auf meßbare oder zumindest quantitativ abschätzbare Einflußgrößen, so nennt man sie "deterministisch" (ANDREWS u. McLONE 1976).

Ein stochastisches Problem wäre zum Beispiel die Simulation eines Rettungseinsatzes nach einem Lawinenunglück, da hier u.a. der Zeitpunkt des Unglücks, die Verfügbarkeit der Rettungsmannschaft sowie die Transportmöglichkeiten als Zufallsvariable betrachtet werden müssen.

Deterministische Ansätze stützen sich auf Rechenvorschriften, die entweder aus mathematisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet oder empirisch-statistisch aus vorliegenden Beobachtungsdaten gewonnen

wurden. Die Gleichungen zum Abschätzen extremer Lawinenreichweiten, die LIED u. BAKKEHOI (1979) und ZENKE u. HILDEBRANDT (1983) über multiple Regressionsrechnung fanden, sind solche statistisch erarbeiteten Modelle. In den Formeln treten als wesentliche Bestimmungsgrößen nur Geländeparameter auf, wie beispielsweise die Größe und Neigung der Lawinenanrißfläche und die Gestalt des Lawenstrichs.

Ein Großteil der bisher entwickelten Verfahren zum Berechnen der Reichweiten möglicher Lawinen, beruht auf mathematisch-physikalisch abgeleiteten Modellansätzen. Dabei geht man von bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten aus und baut das Modell auf den entsprechenden Grundgleichungen der Physik auf. KÖRNER (1980) skizziert die wichtigsten Modelle der Lawinenbewegung und schildert kurz die theoretischen Überlegungen, die diesen Modellen zugrunde liegen. Bei ihrem Vergleich wird deutlich, daß beim Aufstellen der Bewegungsmodelle nach Analogien in verschiedenen Teilbereichen der Physik gesucht wurde. Das HELMSche Schlittenmodell (nach KÖRNER 1980) geht beispielsweise vom Bewegungsverhalten starrer Körper auf einer Gleitbahn aus, das VOELLMY-Modell (VOELLMY 1955) und einige darauf aufbauende Verfahren (SALM 1966, KÖRNER 1976) basieren auf den Gesetzen der stationären Gerinneströmung und LANG u.a. (1979) vergleichen die Lawinenbewegung mit der nichtstationären, laminaren Strömung einer zähen Flüssigkeit. MEARS (1980) schlägt vor, die Größe der Bruchstücke und Klumpen in einer Lawine mit zu berücksichtigen und bezeichnet seinen Ansatz als "fragment flow model". KÖRNER (1980) führt diese Idee fort und zeigt, daß auch die an Kornströmen gewonnenen Erkenntnisse (BAGNOLD 1954) auf die Lawinenbewegung anwendbar sind.

Doch alle diese theoretischen Ansätze behandeln allenfalls Teilaspekte des tatsächlichen Lawinengeschehens. Die Vielgestaltigkeit der Lawinenbewegung, die auch in der Diversität der Modellansätze zum Ausdruck kommt, läßt sich durch keines der heute bekannten physikalisch abgeleiteten Modelle befriedigend erfassen.

Diese Situation ermuntert, sich von den rein physikalischen Bewegungsmodellen zu lösen und empirisch-statistisches Gedankengut in die theoretischen Ansätze mit einzubauen. Einen Schritt in dieser Richtung taten LAATSCH, ZENKE u. DANKERL (1981) mit ihrem Modell der bahnp parallelen Bewegung der Lawinenfront auf geneigter Bahn. Die Autoren schlagen darin vor, den Lawenstrich abschnittsweise zu unterteilen und die Geschwindigkeit der Front fortlaufend von Teilstrecke zu Teilstrecke zu berechnen, solange bis die ermittelte Geschwindigkeit gleich Null wird und das Ende der Lawinenbewegung gefunden ist.

Die Bewegungsgleichung dazu lautet

$$v_i = \sqrt{v_{i-1}^2 + 2 \cdot s_i \cdot g \cdot (\sin \beta_i - f_i \cdot \cos \beta_i)} \quad (1)$$

v_i ist die Geschwindigkeit am Ende des Abschnitts i . v_{i-1} ist die Geschwindigkeit, welche die Lawinenfront am Ende des vorausgehenden Abschnitts aufwies und mit der sie in die Teilstrecke i eintritt. s_i und β_i geben Länge und Hangneigung des beobachteten Bahnabschnitts wieder. g ist die Erdbeschleunigung und f_i ein Widerstandskoeffizient, der nur für den jeweiligen Bahnabschnitt i gilt.

Die Bewegungsgleichung (1) hat zwar die Struktur einer rein physikalischen Gleitreibungsformel, doch diese Struktur wird durch den Widerstandskoeffizienten f_i überprägt. Während im reinen Gleitreibungsmodell der Reibungskoeffizient nur die Reibung zwischen Objekt und Unterlage charakterisiert, beinhaltet f_i alle, bei der Lawinenbewegung auftretenden Widerstände. Der Luftwiderstand an der Front, die Reibung zwischen den Teilchen der Lawine, der von Wirbeln ausgehende Widerstand, die bewegungshemmenden Querbewegungen und die Rauigkeiten des Untergrundes - sie alle finden ihren Niederschlag im umfassenden Widerstandskoeffizienten f_i . (Eine ausführliche Entwicklung der Bewegungsgleichung (1) findet man bei LAATSCH, ZENKE, DANKERL (1980, S.59).

Mit dem komplexen Widerstandskoeffizienten f_i gewinnt die einfach aussehende Gleichung an Flexibilität und kann auch unterschiedlichsten Formen der Lawinenbewegung gerecht werden. Allerdings erfordert die Anwendung der Rechenvorschrift (1) zunächst eine umfangreiche Datenerhebung an niedergehenden Lawinen. Dabei muß untersucht werden, wie sich Variationen in den Schnee- und Geländeeigenschaften auf den f_i -Wert auswirken. Schneeeigenschaften sind zum Beispiel die Schneeart oder das Volumen niederstürzender Lawinen. Geländecharakteristika können die Rauigkeit des Untergrundes, Krümmungen des jeweiligen Bahnabschnitts oder, bei Runsenlawinen, die Form des Runsenquerschnitts sein.

Um das Beziehungsgefüge Schnee - Gelände - Widerstandskoeffizient zu ergründen, müssen die Schnee- und Geländeparameter vieler niedergegangener Lawinen vor Ort gemessen oder geschätzt werden. LAATSCH, ZENKE, DANKERL (1980) geben Anregungen zu dieser Datenerhebung. Zusätzlich ist der abschnittsspezifische Widerstandskoeffizient f_i zu bestimmen. f_i erhält man aus abschnittsweisen Geschwindigkeitsmessungen an abgesprengten Lawinen. Wenn man die Geschwindigkeiten am Anfang und am Ende einer vermessenen Teilstrecke des Lawenstrichs kennt, so kann man die Gleichung (1) nach f_i auflösen und für den jeweiligen Abschnitt den

Wert des Widerstandskoeffizienten berechnen. Der errechnete f_i -Wert liefert dann zusammen mit den für die Teilstrecke i gültigen Schnee- und Geländewerten eine Stichprobe. Liegen für ein Lawinenereignis mehrere abschnittsweise ermittelte Geschwindigkeitsdaten vor, so kann für jedes Intervall ein eigener f_i -Wert berechnet werden. Damit erhält man pro Lawinenabgang mehrere auswertbare Stichproben. Für eine statistische Analyse der Beziehungen zwischen Schnee, Gelände und dem Widerstandskoeffizienten müssen allerdings sehr viele Stichproben an unterschiedlichen Lawenstrichen und bei variierenden Schneebedingungen gesammelt werden.

Bei dieser Art empirisch gewonnener Modelle gehören Lawinengeschwindigkeiten zum unentbehrlichen Datenmaterial. Aber auch die eingangs erwähnten, rein theoretisch abgeleiteten Bewegungsmodelle bedürfen einer Nachprüfung durch Geschwindigkeitsmessungen, denn erst im Vergleich mit den tatsächlichen Bewegungsabläufen einer Lawine können die Theorien überprüft und die Größe der jeweiligen Widerstandskoeffizienten gefunden bzw. korrigiert werden. Die Messung von Lawinengeschwindigkeiten hat eine zentrale Bedeutung beim Erstellen praxisreifer Lawinenmodelle. Deshalb will ich mit der vorliegenden Arbeit das Ermitteln von Lawinengeschwindigkeiten eingehender behandeln als es bisher in der Lawinenliteratur üblich war.

Die Geschwindigkeit des Schnees innerhalb einer Lawine ist keineswegs überall gleich groß. Wenn man zu einem bestimmten Zeitpunkt an verschiedenen Stellen der Lawine die Geschwindigkeit mißt, so kann man unterschiedliche Ergebnisse erhalten. Werden die gemessenen Geschwindigkeiten mit dem Begriff "Lawinengeschwindigkeit" belegt, so kann dies Anlaß zu Verwechslungen und Fehlinterpretationen geben. Im folgenden wollen wir deshalb die verschiedenen, in einer Lawine gleichzeitig auftretenden Geschwindigkeiten etwas genauer betrachten.

2 Der Begriff der Lawinengeschwindigkeit

2.1 Die Geschwindigkeit der Lawine

Der Begriff "Lawinengeschwindigkeit" wird im allgemeinen Sprachgebrauch und bisweilen auch in der Literatur sehr weit gefaßt. Zum Erstellen von Bewegungsmodellen ist es jedoch notwendig, den Begriff "Lawinengeschwindigkeit" präzise zu definieren und ihn von der Frontgeschwindigkeit und den Geschwindigkeiten einzelner Lawinenteile scharf abzugrenzen.

Die Lawine ist im naturwissenschaftlichen Sinn ein System. Die Geschwindigkeit eines Systems definieren ALONSO u. FINN (1980) als Quotienten aus der Summe der Geschwindigkeits-Massen-Produkte aller Einzelteilchen und der Gesamtmasse des Systems.

$$v_{\text{System}} = \frac{\sum_j m_j \cdot v_j}{M} = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots} \quad (2)$$

Diese Geschwindigkeitsdefinition gilt auch für das System "Lawine". Um sie zu verstehen, stellen wir uns eine Momentaufnahme einer talwärts fließenden Lawine vor. Die Lawine besteht aus sehr vielen einzelnen Schneeteilchen. Auch Wasser- und Luftpartikel werden mitgeführt, und mitunter gehören sogar Erdbrocken, Steine, Äste oder sonstiges mitgerissenes Material zur Lawine.

Jeder dieser Lawinenteile hat eine bestimmte Masse m_j . Die Summe aller Teilchenmassen ergibt die Gesamtmasse m_L der Lawine

$$m_L = \sum_j m_j = m_1 + m_2 + \dots \quad (3)$$

Gleichzeitig weist jedes Teilchen eine bestimmte Geschwindigkeit auf, die in einem bestimmten Augenblick gegebenenfalls auch 0 m/s sein kann. Weil sich die Lawinenpartikel in unterschiedlichen Richtungen bewegen, ordnen wir jedem Teilchen einen Geschwindigkeitsvektor v_j zu ^{*)}. Ein Geschwindigkeitsvektor bringt die Bewegungsrichtung mit zum Ausdruck.

Hätten nun alle Teilchen einer Lawine die gleiche Masse, so könnte man den arithmetischen Mittelwert aller Partikelgeschwindigkeiten berech-

^{*)} Vektoren werden in der vorliegenden Arbeit durch Fettdruck gekennzeichnet.

nen, sofern die Geschwindigkeitsvektoren $\mathbf{v}_j$ bekannt wären. Die Vektoren müßte man aufsummieren und durch die Gesamtzahl der Teilchen dividieren.

Die Teilchenmassen in einer Lawine sind aber sehr ungleich. Deswegen sind sie beim Mitteln der Teilchengeschwindigkeiten zu berücksichtigen. Dies geschieht durch eine gewogene Mittelwertbildung: Dabei wird jede Teilchengeschwindigkeit mit der zugehörigen Teilchenmasse gewichtet. Das bedeutet, Partikel mit großer Masse haben auf die Geschwindigkeit des Systems einen größeren Einfluß als Teilchen mit geringer Masse. Die Wichtung ist rechnerisch eine Multiplikation von Masse und Geschwindigkeit.

Die gewogene Durchschnittsgeschwindigkeit aller Teilchen einer Lawine erhält man, indem man alle Geschwindigkeits-Massen-Produkte aufsummiert und das Ergebnis durch die Summe der Einzelmassen - das ist gleichzeitig die Gesamtmasse der Lawine - dividiert.

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\sum_j m_j \cdot \mathbf{v}_j}{\sum_j m_j} = \frac{\sum_j m_j \cdot \mathbf{v}_j}{m_L} \quad (4)$$

Damit sind wir bei der eingangs gegebenen Definition der Geschwindigkeit eines Systems. Die so ermittelte Durchschnittsgeschwindigkeit ist gleich der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes des Systems (ALONSO u. FINN 1980).

Die Definition des Begriffs Lawinengeschwindigkeit lautet also:

LAWINENGESCHWINDIGKEIT
=
Mittelwert der mit der jeweiligen Teilchenmasse gewichteten Geschwindigkeitsvektoren aller Teilchen einer Lawine
=
Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes der Lawine

Tab.1 Definition des Begriffs Lawinengeschwindigkeit

Man beachte, daß die Definition nur für die Geschwindigkeitsvektoren, nicht für die Geschwindigkeitsbeträge der Teilchen gilt. Wenn sich zum Beispiel in einer Lawine zwei Schneeaggregate gleicher Masse, mit gleicher Geschwindigkeit direkt aufeinander zubewegen, so haben die Geschwindigkeiten dieser Teilchen für die Geschwindigkeit des Systems Lawine keine Bedeutung, denn die entgegengesetzt gerichteten Vektoren heben sich auf (vgl. WESTPHAL 1953, S.39). Bei einer Summenbildung der Geschwindigkeitsbeträge würden derartige Teilchengeschwindigkeiten in das Rechenergebnis mit eingehen.

Die Definition der Lawinengeschwindigkeit $\bar{v}$ basiert auf einer räumlichen Mittelwertbildung. Ein räumlicher Mittelwert beschreibt den Zustand eines Systems von Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt (WESTPHAL 1953). Das räumliche Mittel ist ein Durchschnittswert einer Eigenschaft, die alle räumlich nebeneinander liegenden Teilchen gleichzeitig aufweisen. Eine Eigenschaft der Teilchen kann deren Geschwindigkeit sein.

In Systemen mit sehr vielen Teilchen sind die Eigenschaften der Partikel im Einzelnen oft nicht bestimmbar. Man arbeitet dann theoretisch aber auch meßtechnisch mit den räumlichen Mittelwerten. In der Thermodynamik wird oft so verfahren.

Neben dem räumlichen Nebeneinander kann man auch ein zeitliches Nacheinander durch einen Mittelwert erfassen. Diesen, im allgemeinen gebräuchlicheren Durchschnittswert bezeichnet die Physik als zeitliches Mittel. Nach WESTPHAL (1953) gibt ein zeitlicher Mittelwert den mittleren Zustand eines einzelnen Teilchens in einem Zeitintervall wieder. Wenn wir beispielsweise auf einem Abschnitt der Lawinenbahn das Vorankommen der Lawinenfront messen, so erhalten wir einen zeitlichen Mittelwert, nämlich die mittlere Geschwindigkeit der Front auf der Meßstrecke. Zeitliche Mittelwerte will ich im folgenden durch den Index m kennzeichnen (z.B. v_m), während räumliche Mittelwerte mit einem Querstrich markiert sind (z.B. $\bar{v}$). Mitunter gibt es auch Verknüpfungen beider Mittelwertarten. Die mittlere Lawinengeschwindigkeit $\bar{v}_m$ auf der Lawinenbahn ist der zeitliche Durchschnittswert räumlicher Mittelwerte.

Die Definition der Lawinengeschwindigkeit hat rein theoretische Bedeutung. Weder die Einzelgeschwindigkeiten der Teilchen, noch die Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes können im Gelände gemessen werden. Zudem ändern sich Zahl und Größe der Teilchen beständig. In der Praxis ermittelt man stets nur Teilgeschwindigkeiten des Systems Lawine, zum Beispiel die Frontgeschwindigkeit oder die Geschwindigkeit einzelner Schneeaggregate. Die Ergebnisse solcher Messungen werden jedoch nicht selten mit dem Begriff "Lawinengeschwindigkeit" belegt. Das

stiftet Verwirrung und ich sehe in der mangelnden Exaktheit der Begriffsbestimmung die Ursache für manche unbefriedigende Interpretation von Meßergebnissen. Im folgenden will ich deshalb versuchen darzulegen, welche Geschwindigkeiten im System Lawine gemessen werden können.

2.2 Die Geschwindigkeiten einzelner Teilchen der Lawine

Ein Teilchen einer Lawine ist dadurch bestimmt, daß es eine bestimmte Masse und einen Geschwindigkeitsvektor aufweist. Zu den Teilchen gehören also nicht nur einzelne Schneekristalle, sondern auch verfestigte Aggregate aus Eis- und Schneepartikeln. Schneeklumpen, -brocken und ganze Schneeschollen sind als Lawinenteilchen zu betrachten.

Es gibt kein Lawinenereignis, bei dem sich alle Teilchen einer Lawine mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, denn sonst müßte die Lawine ein starrer Körper sein. Die Geschwindigkeiten - genauer die Geschwindigkeitsvektoren - der Teilchen variieren in jeder Lawine und in jeder Phase der Lawinenbewegung. Ich will dies an den Beispielen einer anreissenden, harten Schneebrettlawine und einer voll entwickelten trockenen Fließlawine erläutern.

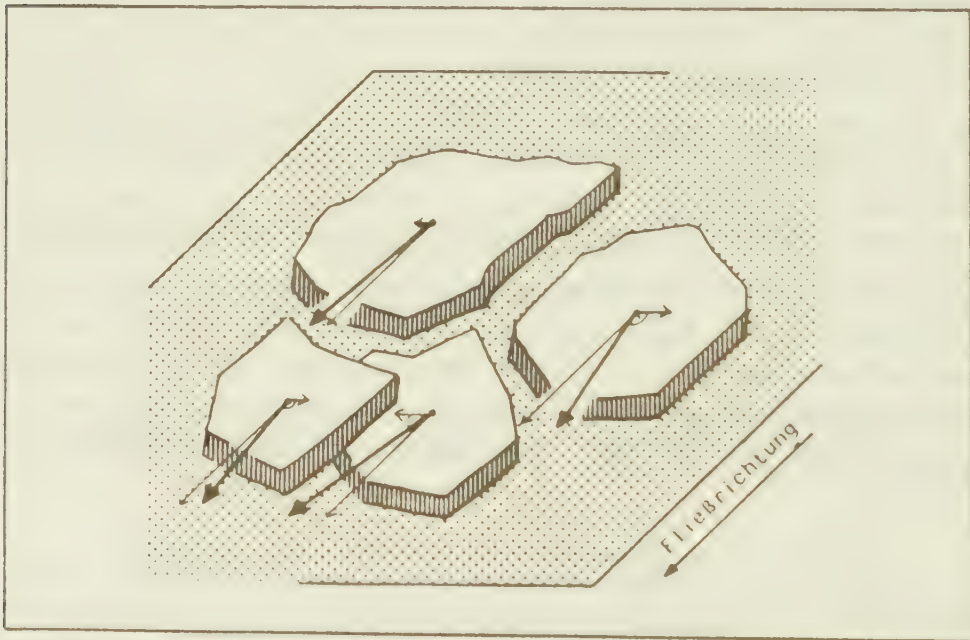


Abb.1 Geschwindigkeitsvektoren einzelner Schneebrettschollen als Resultanten von Bewegungskomponenten, die in Fließrichtung und senkrecht dazu wirken

Lösen wir ein Schneebrett aus, so zerbricht die Schneetafel kurz nach Bewegungsbeginn. Spannungen werden frei. Risse durchziehen das Schneebrett und lassen einzelne, anfänglich große Schneeschollen entstehen (vgl. SCHILD 1973, Abbildung S.80/81). Beobachten wir einige dieser Schneeschollen, während die Lawine sich talwärts bewegt, so erkennen wir, wie die Risse an verschiedenen Stellen aufweiten. Die Schollen driften auseinander. An anderer Stellen wandern die Schneepplatten aufeinander zu und überschieben sich bisweilen. Das bedeutet, es gibt Bewegungsrichtungen quer zur Fließrichtung. Diese Querbewegungen gehen in alle Geschwindigkeitsvektoren der Teilchen mit ein. Der Geschwindigkeitsvektor einer Schneebrettscholle ist dann die Resultante aus der Bewegungskomponente in Fließrichtung und der Komponente senkrecht dazu (vgl. Abb.1).

In der Abb.1 sind die Geschwindigkeitskomponenten in Fließrichtung annähernd gleich lang gezeichnet. In Wirklichkeit treten, nachdem sich das Schneebrett in Bewegung gesetzt hat, sofort auch Geschwindigkeitsdifferenzierungen in Fließrichtung auf^{*)}.

Die Geschwindigkeitsdifferenzierungen nehmen mit dem weiteren Zerfall der Schollen zu. Ist der Schnee trocken, so liefert die Zertrümmerung auch kleinste Partikel, die in die Luft gerissen werden und die Lawine als Schneestaubwolke begleiten. Man unterscheidet dann bei Trockenschneelawinen einen Fließanteil und einen Staubanteil. Bewegungen des Staubanteils sollen im weiteren unberücksichtigt bleiben.

Der Fließanteil einer Trockenschneelawine besteht im allgemeinen aus Schneebröckchen von wenigen Zentimetern bis einigen Dezimetern Größe (MEARS 1980). Die Teilchen weisen unterschiedlichste Geschwindigkeiten auf. Sowohl in der Richtung als auch im Geschwindigkeitsbetrag variieren ihre Bewegungen. Partikel prallen zusammen, werden abgelenkt, gebremst oder angeschoben, kommen kurzzeitig zur Ruhe und erreichen nach einem Anstoß bald wieder höchste Geschwindigkeiten. In einer Trockenschneelawine herrscht eine unübersehbare Vielfalt mehr oder weniger zufälliger Einzelbewegungen. Allerdings dominieren bei diesen Einzelbewegungen die Geschwindigkeitsvektoren in Fließrichtung, denn sonst würde sich die Lawine nicht talwärts bewegen. Nimmt die mittlere Geschwindigkeitskomponente quer zur Fließrichtung zu, so führt dies bei Flächenlawinen zu einer seitlichen Ausbreitung.

^{*)} Die Startphase der bei SCHILD (1973, S.80/81) abgebildeten Schneebrettlawine ist in einer Szene des Lehrfilms "Lawinen - Gefahr für den Skifahrer" des Eidgen. Instituts f. Schnee- und Lawinenforschung festgehalten.

SHIMIZU u.a. (1980) konnten die talwärts gerichteten Geschwindigkeitskomponenten einzelner Schneebrocken in einer Trockenschneelawine messen. Die Ergebnisse schwankten zwischen 9 und 61 m/s. Sie vermitteln einen kleinen Einblick in die Variation der Teilchengeschwindigkeiten in einer Trockenschneelawine.

In der Abb.2 ist die Geschwindigkeitsverteilung einer Fließlawine im runsenförmigen Bereich ihrer Bahn skizziert. Analog zu Erkenntnissen aus der Hydromechanik (SCHMIDT 1957) darf man annehmen, daß die durchschnittlich höchsten Teilchengeschwindigkeiten im Kern der Lawine erreicht werden (vgl. PERLA u. MARTINELLI 1976). Relativ langsam sind die Partikel in der Nähe der Lawinenbahn, dort wo der Lawinenschnee mit dem Untergrund oder den Gerinnewänden in Berührung kommt. Von den Rauigkeitselementen der Bahn gehen Bremseffekte aus, die sich in die Lawine hinein fortpflanzen. Ein mittleres Tempo dürfte die Lawine im Zwischenbereich und an der Oberfläche des Fließanteils aufweisen. Kernzone, bahnahe Zone und Zwischenzone mit Oberflächenbereich gehen fließend ineinander über.



Abb.2 Geschwindigkeitszonen im Inneren einer Lawine

Aus Druckmessungen kann man eine der Abb.2 entsprechende Verteilung für die durchschnittlichen Fließrichtungskomponenten der Teilchengeschwindigkeiten einer Trockenschneelawine ableiten (SHODA 1966, KOTLYAKOV u.a. 1977). Allerdings ist aus Druckangaben die Oberflächenge-

schwindigkeit nicht mehr befriedigend abzuschätzen, da der Fließanteil der Trockenschneelawine nach oben unscharf in die lockere Schneestaubwolke übergeht.

Sowohl in einem anreißenden Schneebrett, als auch in einer voll entwickelten Fließlawine treten Variationen der Teilchengeschwindigkeiten auf. Diese Variationen erlauben es nicht, die Geschwindigkeiten einzelner, zufällig ausgewählter Teilchen als Maß für die Lawinengeschwindigkeit zu verwenden. Geschwindigkeitsangaben, die auf Messungen an einzelnen Partikeln beruhen, ist deshalb stets der Begriff "Teilchengeschwindigkeit" zuzufügen.

2.3 Die Geschwindigkeit von Massenteilen der Lawine

Bewegt sich eine größere Menge von Partikeln, d.h. ein Massenteil der Lawine, mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit, die in Betrag oder Richtung deutlich von den übrigen Geschwindigkeiten in der Lawine abweicht, so ist diesem Massenteil ein eigener Geschwindigkeitsbegriff zuzuordnen.

Beispiele für die unterschiedlichen Bewegungsrichtungen einzelner Massenteile kann man oft beobachten, wenn Naßschneelawinen aus Runsen auf ebene Auslaufflächen austreten. Dann spalten sich die Naßschneelawinen häufig fingerförmig auf (vgl. z.B. SELIGMANN 1936, Fig.276). Die Bewegung der Lawine geht über in ein Nebeneinander von Bewegungen einzelner Massenteile ("Lawinenarme").

Differenzierungen zwischen den Geschwindigkeitsbeträgen einzelner Massenteile sind optisch weniger gut zu erfassen. Sie treten vorwiegend im Inneren der Lawine auf. Im weitesten Sinn kann man jene Partikel, die den schnelleren Kern einer Lawine bilden, zu einem Massenteil mit individueller Geschwindigkeit zusammenfassen. Allerdings sind die Geschwindigkeitsdifferenzierungen zwischen dem Kern einer Lawine und den umgebenden Lawinenbereichen im allgemeinen nicht so groß, daß eine begriffliche Trennung der Geschwindigkeitsangaben notwendig wäre.

Neben den Geschwindigkeitsunterschieden im Lawinenquerschnitt scheinen Trockenschneelawinen auch in der Längsausdehnung Geschwindigkeitsvariationen aufzuweisen. SCHAERER u. SALWAY (1980) beobachteten im Fließanteil schneller Trockenschneelawinen einzelne Massenteile mit hohen, über die durchschnittliche Teilchengeschwindigkeit hinausreichenden Geschwindigkeitswerten. Die Autoren hatten an bestimmten Geländepunkten Druckzellen und seismische Meßgeräte installiert. Sie konnten so neben abschnittsweisen Laufzeitmessungen auch die Teilchengeschwindigkeiten im Inneren einer Lawine erfassen. Dabei bemerkten

sie, daß in fast regelmäßigen Zeitabständen Teilchen mit deutlich höheren Geschwindigkeiten am Meßgerät eintrafen. Von Lawine zu Lawine variierten die Zeitintervalle von 0.69 bis 1.44 Sekunden. Innerhalb einer Lawine blieben sie jedoch relativ konstant. SCHAERER u. SALWAY erkannten darin eine gewisse Periodizität und bezeichneten die Massenteile mit den erkennbar höheren Geschwindigkeiten als "interne Wellenfronten".

Aus dem Vergleich seismischer Aufzeichnungen ermittelten die Autoren an einer Lawine die mittlere Geschwindigkeit einer internen Wellenfront für eine 30 m lange Meßstrecke. Die Geschwindigkeit betrug 34 m/s. Die gleiche Lawine hatte im gleichen Meßbereich eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 24 m/s.

Die Geschwindigkeitsdifferenzierungen im Inneren einer Trockenschneelawine führen zu einem pulsierenden Fließverhalten. Dieses Pulsieren konnten SHIMIZU u.a. (1980) ebenfalls meßtechnisch erfassen. Die Messungen fanden an einer "high-speed"-Lawine statt, über deren mittlere Frontgeschwindigkeit leider keine Angaben vorliegen. Die Geschwindigkeiten der internen Wellenfronten schwankten nach Aussage der japanischen Wissenschaftler zwischen 9 und 61 m/s, doch lassen die Aufzeichnungsdiagramme (SHIMIZU u.a. 1980, Fig.7) den Schluß zu, daß bisweilen das Eintreffen der Wellenfronten am Meßgerät und der Aufprall einzelner größerer Schneeaggregate auf die Druckaufnehmerplatten nicht zu unterscheiden war.

Interne Wellenfronten und die damit verbundenen pulsierenden Bewegungen scheinen vorwiegend in schnellen Trockenschneelawinen aufzutreten. Mit zunehmender Durchfeuchtung des Lawinenschnees nehmen die Geschwindigkeitsschwankungen in Fließrichtung ab und im Inneren von Naßschneelawinen konnte SCHAERER (1981) keine Wellenfronten mehr feststellen.

Das ausgeprägte Vorkommen interner Wellenfronten in schnellen Trockenschneelawinen läßt auf Analogien zur Gerinnehydraulik schließen. SCHAERER u. SALWAY (1980) erinnern, daß in einem offenen Gerinne bei hohen Abflußgeschwindigkeiten und gleichzeitig relativ geringen Fließhöhen sogenannte überturbulente Strömungen auftreten (WEDERNIKOV-Kriterium, vgl. MOSTKOV 1956). Ein Charakteristikum dieser überturbulenten Strömungen sind Strömungsinstabilitäten, und eine Beunruhigung des Fließverhaltens in der Strömungsrichtung. Das gleichmäßige Strömen geht dann in eine Wellenbewegung über, die MOSTKOV (1956) als pulsierenden Abfluß bezeichnet.

2.4 Die Geschwindigkeit der Lawinenfront

Der Lawinenfrontgeschwindigkeit kommt in der Lawinenforschung eine besondere Bedeutung zu, da viele optische und mechanische Meßverfahren die Ortsveränderungen der Front verfolgen. Im allgemeinen ermittelt man die Zeitpunkte, zu denen die Front der niederstürzenden Lawine bestimmte Meßpunkte passiert oder man beobachtet den Lawinenabgang in definierten Zeitabschnitten und ortet die Lage der Lawinenfront im Gelände. Bei beiden Meßprinzipien, auf die später ausführlich eingegangen wird, erhält man Strecken- und Zeitintervalle Δs und Δt und daraus die bahnparallelen mittleren Geschwindigkeiten der Lawinenfront zwischen den Beobachtungspunkten. Doch diese Geschwindigkeitsmessung ist in vielen Fällen nicht so eindeutig, wie sie auf den ersten Blick erscheint.

SHIMIZU u.a.(1980) beschreiben die Geschwindigkeitsvariation an der Front einer Trockenschneelawine für ein kurzes Zeitintervall von 2 Sekunden. Grundsätzlich stellen sie fest, daß die seitlichen Randbereiche der Front langsamer vorankamen als die zentralen Massenteile. Doch auch in der Strommitte schwankten die Frontgeschwindigkeiten in dem kurzen Beobachtungsintervall noch sehr stark. Die Geschwindigkeiten einzelner Massenteile variierten zwischen 20 und 60 m/s.

Solche unregelmäßigen Bewegungsabläufe lassen sich häufig an Lawinenfronten beobachten. Man sieht, wie an Teilen der Front Schneemassen pfeilartig nach vorne schießen, wie an anderer Stelle die Bewegung abgebremst wird und wie das langsame Fließen wenig später plötzlich in eine schnelle Bewegung übergeht. Ein welliger, ungleichmäßig gebuchter Frontverlauf ist ein deutliches Zeichen dieser Geschwindigkeitsdifferenzierungen.

Bei Runsenlawinen tritt die wellige Ausformung der Front weniger in Erscheinung; Geschwindigkeitsschwankungen sind jedoch auch bei ihnen zu erkennen. Man beobachtet dann ein abwechselnd langsames und schnelles Fließen der vordersten Teile der Lawine.

Woher kommt diese unregelmäßige Frontbewegung? Die im vorherigen Abschnitt bereits kurz beschriebenen Beobachtungen von SCHAERER und SALWAY (1980) könnten eine Erklärung geben:

SCHAERER und SALWAY erkannten im Fließanteil verschiedener Trockenschneelawinen interne Wellenfronten, die sich im Mittel schneller bewegten als die Front der jeweiligen Lawine (vgl. S.12). Demzufolge ist zu erwarten, daß die internen Längswellen an die Spitze der Lawine vordringen und dort kurzfristig zu einer Erhöhung der Frontgeschwindig-

keit führen. Das bereits erwähnte Meßbeispiel SCHAERERS wies eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 24 m/s und gleichzeitig eine mittlere Geschwindigkeit der internen Wellenfront von rund 34 m/s auf. Aus diesen Werten erhält man eine durchschnittliche Relativgeschwindigkeit der Welle, das ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Welle in der Lawine fortpflanzt, von 10 m/s. SCHAERER beobachtete bei der untersuchten Lawine das Eintreffen der Wellenfronten am Meßgerät in einem zeitlichen Abstand von 0.8 Sekunden. Daraus kann man abschätzen, daß die Wellenfronten in der Lawine einen Abstand von rund $34 \text{ m/s} \cdot 0.8 \text{ s} = 27 \text{ m}$ hatten und daß sie bei einer Relativgeschwindigkeit von 10 m/s etwa alle 2,7 Sekunden an der Spitze der Lawine eintreffen mußten.

SCHAERERS und SALWAYS (1980) Meßeinrichtung erfaßte die Druckschwankungen im Inneren der Lawine an einzelnen Meßpunkten der Bahn und die mittleren Geschwindigkeiten der Lawinenfront und interner Wellenfronten für einzelne Meßabschnitte. Die Meßanlage war nicht darauf abgestellt, den Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront über eine längere Geländestrecke detailliert zu verfolgen, so daß die durchgeführte Abschätzung nicht weiter nachgeprüft werden kann. Die den Geschwindigkeitsverlauf an der Front relativ gut wiedergebenden Messungen von BRIUKHANOV (1968) und KOTLYAKOV u.a. (1980) bestätigen allerdings die Vermutung, daß es bei Trockenschneelawinen zu einer rythmisch pulsierenden Frontbewegung kommen kann. Eigene Lawinenbeobachtungen bestärken diese Annahme.

Da sich die Geschwindigkeitsschwankungen an der Front teilweise gravierend auf Meßresultate auswirken können, will ich die vermuteten Vorgänge an der Lawinenfront noch einmal schematisiert darstellen, um ein Grundgerüst für spätere rechnerische Abschätzungen zu erhalten.

In der Abbildung 3 auf Seite 15 versinnbildlichen die unregelmäßig punktierten Balken die gesamte Lawine. Die Lawine bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit $\bar{v}$. Wir bringen dies durch einen stets gleich langen, stark ausgezogenen Pfeil (= Geschwindigkeitsvektor) zum Ausdruck. Diese konstante Geschwindigkeit herrsche im Punkt A der Lawinenbahn auch an der Front: $v_F = \bar{v}$. Gleichzeitig erkennen wir unter A eine interne Wellenfront - schematisch dargestellt durch den wellig schraffierten Balken -, die mit höherer Geschwindigkeit $\bar{v}_W$ der Lawinenfront zustrebt. Der unterbrochene Pfeil sei der Geschwindigkeitsvektor der Wellenfront.

Die jeweils breiter gezeichnete Pfeilspitze von Wellenfront- oder Lawinenbalken gibt an, welcher Geschwindigkeitsvektor die Frontgeschwindigkeit bestimmt.

Am Punkt B hat die schnellere, interne Wellenfront den vorderen Rand der Lawine erreicht. Die mit höherer Geschwindigkeit ankommenden Masenteile brechen durch und bilden die neue Lawinenfront. Dieser Vorgang

führt zu einem sprunghaften Anstieg der Frontgeschwindigkeit. In der Folge (C-E) werden die anfangs sehr schnellen, vorausseilenden Massenteile durch den Luftwiderstand, durch Rauigkeitselemente der Bahn und durch den in der Bahn liegenden Schnee abgebremst. Die Frontgeschwindigkeit nimmt ab. Weil die pfeilartig nach vorne gestoßenen Massenteile eine meist deutlich geringere Fließhöhe haben als die nachfolgenden Lawinenteile, sinkt die Frontgeschwindigkeit unter das Niveau der konstant gedachten Lawinengeschwindigkeit (E-F), denn die Geschwindigkeit strebt auf ebengeneigten, gleichmäßig rauhen Bahnabschnitten einem von der Fließhöhe abhängigen Grenzwert zu (KÖRNER 1980). In der Folge werden die vorausgeeilten Massenteile eingeholt und mitgenommen (G,H). Die Frontgeschwindigkeit nimmt wieder den Wert $v_F = \bar{v}$ an (H). Gleichzeitig erkennen wir im Hintergrund eine weitere Wellenfront, die im Bereich von (K) zu einem erneuten sprungartigen Anstieg der Frontgeschwindigkeit führt.

Im unteren Teil der Abbildung 3 ist der Verlauf der Frontgeschwindigkeit des schematisierten Vorganges dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die Frontgeschwindigkeit teilweise über und teilweise unter der

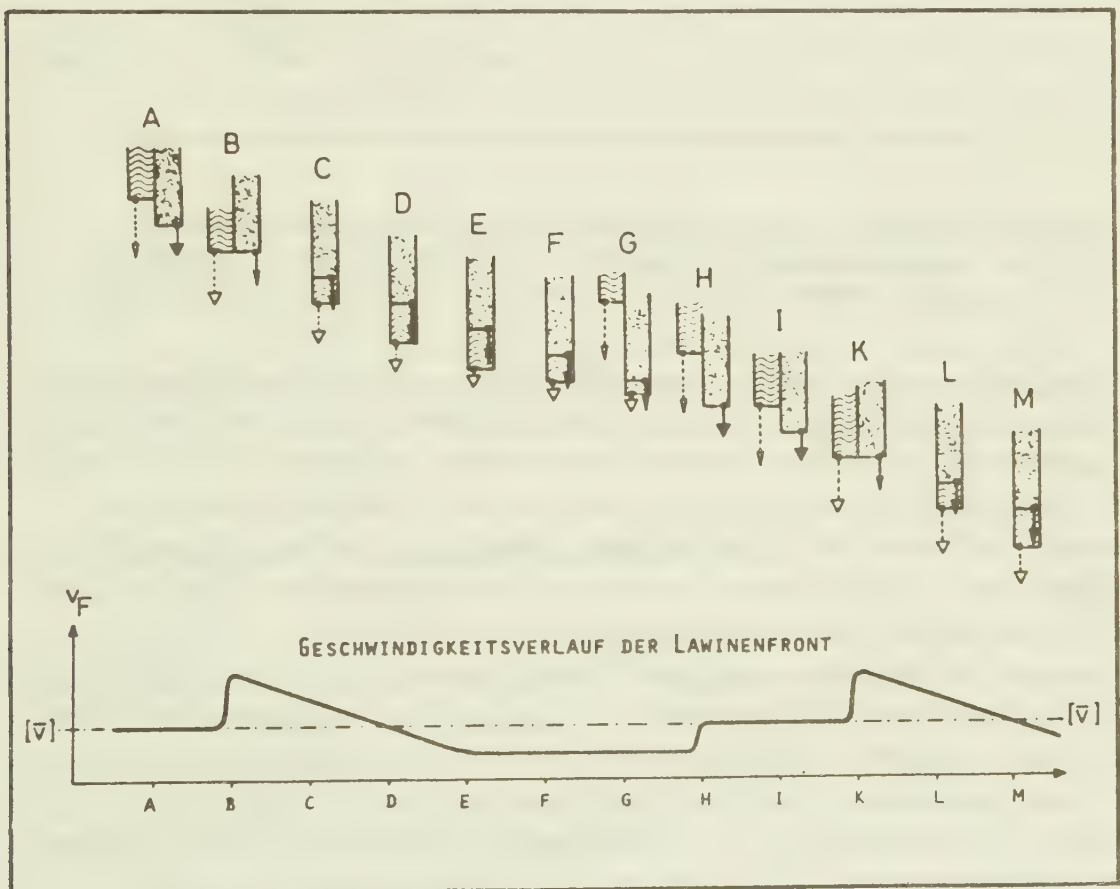


Abb.3 Schematische Darstellung der pulsierenden Frontbewegung einer Trockenschneelawine

konstant gedachten Lawinengeschwindigkeit liegt. Diese Schwankungen können Fehlinterpretationen bei der Auswertung von Geschwindigkeitsmessungen hervorrufen. Ich will dies an einem Beispiel demonstrieren:

Stellen wir uns eine Lawine mit konstanter mittlerer Geschwindigkeit von 30 m/s vor. Die Front soll in der beschriebenen Form von der mittleren Geschwindigkeit abweichen und Werte zwischen 20 und 40 m/s annehmen. Um leichter rechnen zu können wurde der aus Abb.3 übernommene Geschwindigkeitsverlauf in der Abb.4 weiter schematisiert. Die idealisierte Lawine gehe auf einem gleichmäßig geneigten Hang nieder. In dem Hang seien im Abstand von 50 m Meßpunkte eingerichtet.

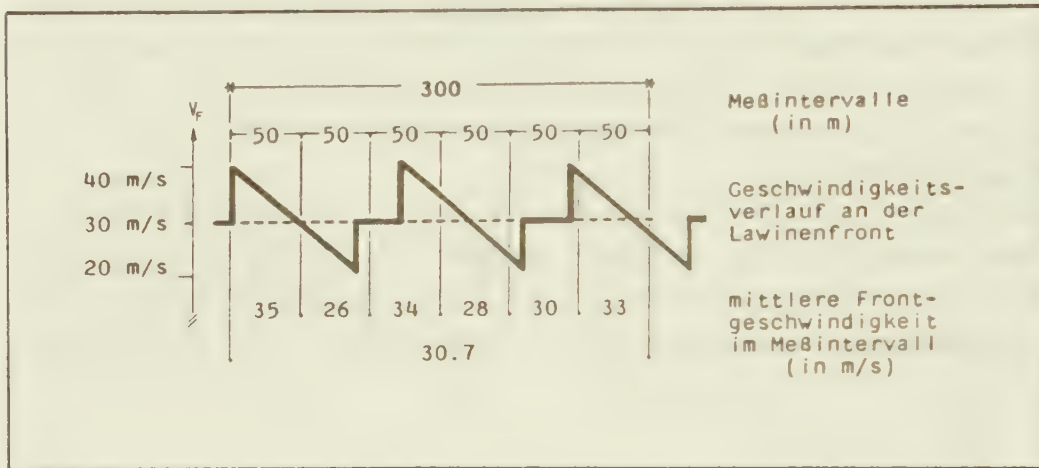


Abb.4 Variation der mittleren Frontgeschwindigkeit auf 50 m langen Meßintervallen einer 300 m langen Meßstrecke bei pulsierender Bewegung der Lawinenfront (vgl.dazu Abb.3)

In der Abb.4 sind unter der Kurve die mittleren Frontgeschwindigkeiten aufgelistet, wie sie sich für die einzelnen Meßintervalle ergeben. Diese abschnittswise Geschwindigkeiten schwanken zwischen 35 und 26 m/s. Die Schwankungen treten auf, weil man bei der Mittelwertbildung unterschiedliche Phasen der Frontbewegung einbezieht. Im Beispiel der Abb.4 weichen die in 50 m-Intervallen gemittelten Frontgeschwindigkeiten bis zu 15 % von der mittleren Lawinengeschwindigkeit ab.

Wie groß bei tatsächlichen Geschwindigkeitsmessungen die Schwankungen je Meßintervall sind und wie weit die auf kurzer Meßstrecke erhobenen mittleren Frontgeschwindigkeiten von der mittleren Lawinengeschwindigkeit abweichen, hängt vom Grad des Pulsierens an der Front und von der Wahl der Meßstrecken ab. In ungünstigen Situationen dürften durchaus Abweichungen von über 50 % auftreten (vgl. Abschn.4.5).

Solche Ergebnisse können vor allem dann zu fehlerhaften Interpretationen und Schlüssen führen, wenn man versucht, mit den kleinräumig gewonnenen Geschwindigkeitsdaten theoretische Modelle zu stützen, die das

Pulsieren der Front nicht berücksichtigen. Dann besteht die Gefahr, daß diese Geschwindigkeitsvariationen irgendwelchen Gelände- und Rauigkeitsparametern zugeordnet werden.

Vergrößert man das Meßintervall, so durchläuft der frontale Massenteil im Beobachtungszeitraum schnelle und langsame Geschwindigkeitsphasen. Der Beobachtungsausschnitt wird damit allgemeingültiger. Verwenden wir in dem Beispiel der Abb.4 ein 300 m langes Meßintervall, so erhalten wir dafür eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 30.7 m/s. Der Fehler ist jetzt kleiner und die, auf der Meßstrecke bestimmte mittlere Frontgeschwindigkeit deckt sich nahezu mit der konstant gedachten Lawinengeschwindigkeit.

Wechselnde Geländeformen und Rauigkeitsgrade der Unterlage führen ebenfalls zu schwankenden Geschwindigkeitsverläufen. Die Geschwindigkeitsänderungen lassen sich dann jedoch meist mit Geländeeigenschaften korrelieren, sie weisen im allgemeinen keine Rhythmen auf. Annähernd periodische Geschwindigkeitsverläufe lassen dagegen interne lawindynamische Vorgänge als Ursache erwarten.

Messungen der Frontgeschwindigkeiten sollten deshalb vor allem bei Trockenschneelawinen entsprechend vorsichtig interpretiert werden. Nicht in allen Fällen können sie als Maß für die Lawinengeschwindigkeit dienen.

Mit zunehmender Durchfeuchtung des Lawinenschnees nimmt die interne Wellenbewegung ab (SCHAERER 1981). Gleichzeitig beruhigt sich der Geschwindigkeitsverlauf an der Front. Das Pulsieren tritt nicht mehr auf, und die auf beliebigen Meßstrecken erhobenen mittleren Frontgeschwindigkeiten können ohne größere Schwierigkeiten als Ersatz für die Lawinengeschwindigkeit in modelltheoretischen Analysen verwendet werden.

2.5 Die Aussagekraft der meßbaren Geschwindigkeiten

Die "Lawinengeschwindigkeit" ist ein wichtiger Bestandteil der lawindynamischen Modellrechnung. Nahezu jede Rechenmethode enthält Formeln und Rechenvorschriften zum Bestimmen der Lawinengeschwindigkeit und in vielen theoretischen Modellen treten Gleichungen zur Reichweiten-, Auslauflängen- und Stoßdruckberechnung auf, die ohne Geschwindigkeitsangaben nicht auskommen. Da die Rechenmodelle im allgemeinen die Lawine in ihrer Gesamtheit betrachten, muß man den Theorien die Definition der Lawinengeschwindigkeit aus Abschnitt 2.1 zu Grunde legen. Vereinfachend kann man dabei die vektorielle Darstellungsweise vernachlässigen und sich nur auf die fließrichtungsparallele Komponente der Lawinengeschwindigkeit stützen. Aber auch dieser Wert ist im Gelände nicht meß-

bar. Meßbar sind Geschwindigkeiten von Massenteilen im Inneren der Lawine und an der Lawinenfront.

Um die Verbindung zwischen den meßbaren Geschwindigkeiten und der Lawinengeschwindigkeit herstellen zu können, muß man wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen zu Hilfe nehmen. Danach ist in einem, aus sehr vielen Einzelmassen bestehenden System der für einen bestimmten Zeitpunkt t_x geltenden räumliche Mittelwert der Geschwindigkeiten aller Teilchen im statistischen Sinn gleich der mittleren Geschwindigkeit, die ein bestimmter Massenteil in einem repräsentativen Zeitintervall Δt aufweist (WESTPHAL 1953). Ein Zeitintervall ist als repräsentativ anzusehen, wenn der beobachtete Massenteil in dieser Zeitspanne statistisch gesehen alle Geschwindigkeitsphasen durchläuft, die im Zeitpunkt t_x von verschiedenen Massenteilen eingenommen werden.

Die Abb.4 auf Seite 16 verdeutlicht (allerdings für Längenintervalle) den Begriff der Repräsentativität: Wenn man dort den Geschwindigkeitsverlauf der Front auf 120 m langen Meßabschnitten beobachtet, so durchläuft die Front in dieser Spanne sowohl schnelle als auch langsame Bewegungsphasen und der Durchschnittswert der Frontgeschwindigkeit ist gleich der konstant gedachten Lawinengeschwindigkeit von 30 m/s. Das repräsentative Meßintervall beträgt in diesem Beispiel also 120 m oder $120\text{m} / 30\text{m/s} = 4$ Sekunden.

Für die praktische Durchführung von Geschwindigkeitsmessungen sind zum jetzigen Zeitpunkt kaum Hinweise auf die Größe des repräsentativen Meßintervalls zu geben, denn die auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen hängen mit von der Schneeart und vom Volumen der niedergehenden Lawinen ab. Erst eine Anzahl von Messungen, die den Geschwindigkeitsverlauf von Massenteilen an der Front oder im Inneren der Lawine detailliert wiedergeben, können dazu beitragen, Kriterien für die Auswahl repräsentativer Meßintervalle festzulegen. Grundsätzlich dürfen wir jedoch davon ausgehen, daß erhobene Geschwindigkeitsmittelwerte mit zunehmender Meßintervalllänge repräsentativer werden, d.h. der tatsächlichen durchschnittlichen Lawinengeschwindigkeit auf der Teilstrecke nahekommen. Gleichzeitig sinkt aber der Informationsgehalt bei größeren Meßstrecken. Umgekehrt führen Kurzstreckenmessungen zu Detailaussagen, die aber oft stark schwanken und deshalb schwer in allgemeingültige Modelle eingebracht werden können.

In Abschnitt 4 (S.89 ff) werden wir an einem konkreten Beispiel noch einmal auf die Aussagekraft von gemessenen Geschwindigkeiten eingehen. Dann wird beispielhaft gezeigt, wie man rechnerisch aus gemessenen, pulsierenden Frontgeschwindigkeitswerten auf die Lawinengeschwindigkeit schließen kann.

Zunächst wollen wir uns jedoch den Methoden der Geschwindigkeitsmessung zuwenden, denn nur wenn bekannt ist, wie Geschwindigkeiten an Lawinen erhoben werden, kann man deren Aussagekraft annähernd beurteilen.

3 Meßverfahren zum Ermitteln der Geschwindigkeiten von Lawinen

Es gibt verschiedene Verfahren, die Geschwindigkeiten von Lawinen oder von Teilen der Lawinen zu messen. Um diese Verfahren in ein Ordnungsschema zu bringen, kann man von der Meßtechnik ausgehen. Die einfachen Meßmethoden stehen am Anfang, die technisch ausgefeilten, hochkomplizierten Meßsysteme bilden den Abschluß.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, jenen Massenteil der Lawine, dessen Geschwindigkeit gemessen wird als Ordnungskriterium zu verwenden. Man könnte dann Meßverfahren abgrenzen, die zu Frontgeschwindigkeitswerten führen. Andere Meßtechniken erfassen die Geschwindigkeiten von Massenteilen in der Lawine, und einige Methoden liefern sowohl von der Front als auch aus dem Inneren der Lawine Daten.

Wir wollen einem dritten Ordnungsprinzip den Vorzug geben, und zwar der Meßdistanz, für welche die erfaßten Geschwindigkeiten gelten.

Das erste vorgestellte Verfahren liefert die Durchschnittsgeschwindigkeit für die gesamte Lawinenbahn. Danach folgen Methoden, mit denen man mittlere Geschwindigkeiten auf Bahnabschnitten erhält, und anschließend wollen wir Meßverfahren besprechen, die zu den an bestimmten Bahnpunkten herrschenden Geschwindigkeiten führen. Den Abschluß bildet das Ermitteln von Geschwindigkeitsverläufen.

3.1 Pauschale Laufzeitmessungen

Pauschale Durchschnittsgeschwindigkeiten erhält man aus Gesamtlaufzeitmessungen. Das sind Zeitnahmen vom Moment der Lawinenauslösung bis zum Stillstand der Lawinenfront. Am einfachsten gewinnt man solche Meßwerte mit Hilfe einer Stoppuhr.

Bei Schneebrettlawinen wird im allgemeinen die Laufzeit der vordersten Frontspitze von der unteren Anrißkante A_u bis zum Lawinenendpunkt E ermittelt (Abb.5). In vielen Fällen der Praxis ist A_u nicht eindeutig zu bestimmen und muß geschätzt werden. Die Fehler, die dadurch in die Geschwindigkeitsbetrachtung eingehen, kann man jedoch vernachlässigen, wenn die Längenausdehnung des angerissenen Schneebrettes gering ist im Verhältnis zur Gesamtlänge der Lawinenbahn. Als Meßergebnis erhält man die mittlere Frontgeschwindigkeit der Lawinen zwischen A_u und E. Da die mittlere Frontgeschwindigkeit auf langen Meßstrecken, insbesondere vom Anriß bis zum Lawinenstillstand, als repräsentativ anzusehen ist, darf der gewonnene Meßwert ohne weiteres der mittleren Lawinengeschwindigkeit gleichgesetzt werden.

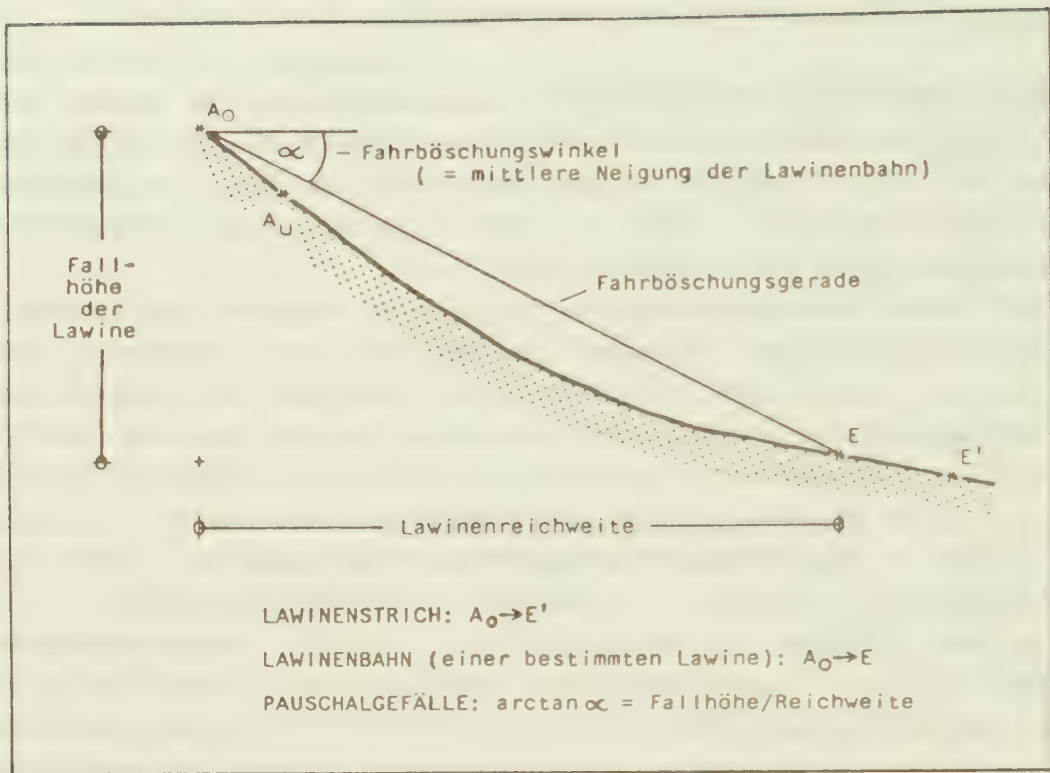


Abb.5 Längsprofil eines Lawenstrichs $A_0 - E'$ mit der Bahn einer von A_0 bis E vorgedrungenen Lawine

Bei Lockerschneelawinen mit punktförmigem Anriß existiert keine untere Anrißkante. Deswegen sollte man die vom Auslöszeitpunkt bis zum Frontstillstand gemessene Laufzeit auf eine Abschätzung des Massenmittelpunktweges beziehen. Die Lage des Massenmittelpunktes im Ablagerungskegel ist zu schätzen. Der Massenmittelpunkt am Anfang der Bewegung liegt im Punkt des Anrisses, also bei A_0 . Auch bei dieser Wegschätzung können Fehler auftreten, die aber auf größeren Lawinenbahnen nicht ins Gewicht fallen. Teilt man die Länge des Massenmittelpunktweges durch die erhobene Gesamtlaufzeit, so erhält man die mittlere Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes und das ist nach der Definition in Abschnitt 2.1 (Seite 6) die mittlere Lawinengeschwindigkeit auf der beobachteten Strecke.

An natürlich abgehenden Lawinen sind Gesamtlaufzeitmessungen äußerst schwierig durchzuführen. OECHSLIN (1938) erwähnt, daß es wertvolle Zufälle sind, wenn derartige Messungen gelingen. OECHSLIN hatte in den Jahren 1928-38 im Gotthardgebiet 16 mal das Glück, Lawinen in ihrem

ganzen Durchlauf beobachten und die Fallzeiten messen zu können. Mit seinen Beobachtungsdaten konnte er erstmals etwas über die mittleren Geschwindigkeiten verschiedener Lawinenarten aussagen. So beobachtete er bei Grundlawinen eine Schwankungsbreite von 11 bis 26 m/s, bei Oberflächenlawinen, das dürften Trockenschneelawinen mit begleitender Schneestaubwolke gewesen sein, im Durchschnitt 47 m/s und bei reinen StaUBLawinen Extremwerte der mittleren Lawinengeschwindigkeit von 116 m/s. Diese Erkenntnisse über die mittleren Geschwindigkeiten von Lawinen haben bis heute ihre Gültigkeit behalten (vgl. MELLOR 1979, Tab.II).

Obschon man heute Lawinen künstlich leichter auslösen kann als in früheren Zeiten, gibt es doch nur wenige zuverlässige Ergebnisse über pauschale Laufzeitmessungen. Das machen folgende Erschwernisse verständlich:

a) Witterung und Stabilität der Schneedecke: Die besten Erfolgsaussichten, Lawinen künstlich auszulösen, sind kurz nach einem größeren Schneefall oder nach einer längeren Windverfrachtungsphase gegeben (SALM 1982). Zu diesen Zeiten erlauben die Sichtverhältnisse oft keine Beobachtungen. Bis zum Aufklaren kann die Setzung und Stabilisierung der Schneedecke schon soweit fortgeschritten sein, daß die Lawine für die beabsichtigte Messung nicht mehr ausgelöst werden kann.

b) Geländeverhältnisse: Im bayerischen und teilweise auch im österreichischen Alpenraum findet man in der Nähe vieler Lawenstriche, an denen Lawinen künstlich ausgelöst werden, keine geeigneten Beobachtungsstandpunkte. Die Beobachtungsstelle muß auch nach starken Schneefällen und bei allgemein großer Lawinengefahr sicher erreichbar sein und für Gesamtlaufzeitmessungen den Einblick in das Anrißgebiet und die Ablagerungszone gewähren. Außerdem ist darauf zu achten, daß eine mögliche Schneestaubentwicklung beim Lawinnenniedergang die Sicht vom Meßstandpunkt aus nicht behindert. Ein Beispiel für eine eingeschränkte Beobachtungsmöglichkeit ist der Lawenstrich in Abb.6. Dieser Lawenstrich am Wendelstein, an dem sich 1974 ein folgenschweres Lawinenunglück ereignete, ist vom im Winter erreichbaren Beobachtungsstandpunkt aus zwar voll überschaubar; die Front der dort niedergehenden Lawinen ist aber nur bis zur Zahnradbahntrasse gut zu verfolgen. Nachdem die Lawinen die Trasse passiert haben, verhindern Schneestaubwolken, die bei den dort gesprengten Lawinen fast regelmäßig auftreten, weitere Beobachtungen.

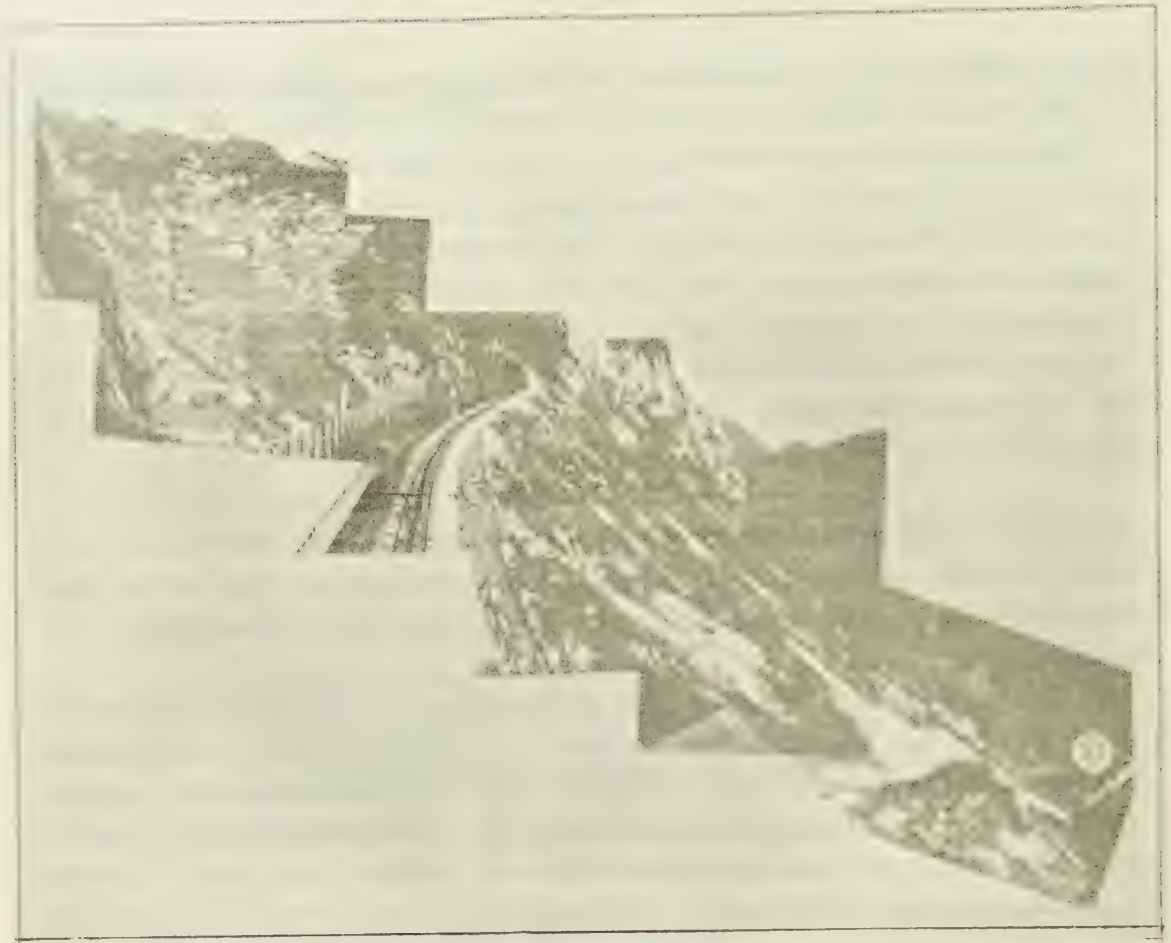


Abb.6 Lawenstrich am Wendelstein (Bayerische Voralpen)

c) Risiko: Der Weg und die Reichweite niederstürzender Lawinen ist nie exakt vorausbestimmbar. Insofern sind künstliche Lawinenauslösungen stets mit einem gewissen Unsicherheitsfaktor verbunden und immer wieder auftretende Unglücks- und Schadensfälle durch abgesprengte Lawinen verdeutlichen dies (vgl. z.B. Winterbericht des E.I.S.L.F, Nr.35, S.139). Das stets vorhandene Risiko steigt beispielsweise, wenn während einer Schneefallperiode zu lange mit der künstlichen Lawinenauslösung gewartet wird. Aber gerade für Lawinenbeobachtungen und -messungen wäre es häufig von Interesse, größere Neuschneehöhen abzuwarten. Daß dieses Risiko in vielen Fällen weder von wissenschaftlicher Seite noch von dem für das Absprengen der Lawinen zuständigen Personenkreis eingegangen werden kann, ist durchaus verständlich.

d) Interessenskonflikte: Sicherheits- und verantwortungsrechtliche Gesichtspunkte behindern in Bayern im allgemeinen das künstliche Auslösen von Lawinen für rein wissenschaftliche Zwecke. Deshalb ist es notwendig, Untersuchungen und Geschwindigkeitsmessungen dort durchzuführen, wo Lawinensprengungen routinemäßig zur Sicherung von Skipisten und Verkehrswegen erfolgen. Ein Großteil der so ausgelösten Lawinen ist für Untersuchungszwecke nicht geeignet, da die Lawinen am frühen Morgen bei ungenügenden Lichtverhältnissen oder mit großer Eile während des Tages gesprengt werden. Die beim Messen und Datenerheben zwangsläufig auftretenden Verzögerungen in der Freigabe der Skiabfahrten und Verkehrswege sind oft wirtschaftlich nicht vertretbar.

Ist es im Hinblick auf solche Erschwernisse überhaupt angebracht, die wenig ergiebig erscheinende Gesamtlaufzeit in den Katalog der zu sammelnden Lawinendaten aufzunehmen? Ich glaube schon, denn im Gegensatz zu vielen, oft detaillierteren Geschwindigkeitsmessungen an Lawinen, bietet sich die Durchschnittsgeschwindigkeit für eine allgemein-statistische Auswertung an: Der Meßgeräteaufwand ist gering, die für Gesamtlaufzeitmessungen ausreichenden, handelsüblichen Stoppuhren können von jedermann bedient werden, und in die Lawinenhänge müssen keine Markierungen eingebracht werden. So könnten trotz aller Hindernisse pauschale Laufzeiten in größerem Umfang an unterschiedlichen Hängen und bei verschiedenen Schneeverhältnissen gewonnen werden.

Die Pauschalgeschwindigkeit geht dann zusammen mit Schnee- und Geländedaten in die statistische Auswertung ein (vgl. LAATSCH u.a. 1981). Man erhält ein Beziehungsgefüge Schneeart - Anrißvolumen - Geländeform - Durchschnittsgeschwindigkeit - Pauschalgefälle - Reichweite, das statistisch analysiert, wichtige Erkenntnisse für weiterführende, lawindynamische Überlegungen liefern kann.

3.2 Abschnittsweise durchgeführte Laufzeitmessungen

3.2.1 Meßtheoretische Überlegungen

Abschnittsweise durchgeführte Laufzeitmessungen liefern die Zeitangaben zum Berechnen mittlerer Geschwindigkeiten auf Teilstrecken des Lawinestrichs. Man setzt die Länge der ausgewählten Meßstrecke zur gemessenen Zeit in Beziehung und ermittelt die gesuchte Durchschnittsgeschwindigkeit. Da die Lawinenfront oft der einzig gut erkennbare Bezugsort in der Lawine ist, führen viele Meßverfahren zur abschnittsweise gemittelten Frontgeschwindigkeit. Seltener sind Messungen der mittleren Geschwindigkeiten interner Massenteile.

Die unregelmäßige Form der Lawinenfront erschwert den Meßvorgang sehr. Nur selten und höchstens kurzfristig verläuft die Front geradlinig. Gewöhnlich zeigt sie Ausbuchtungen, deren Lage an der Lawinenstirn wechseln; denn der Lawinenstrom paßt sich den Unebenheiten des Geländes an. Zudem erzeugen die verschiedenen, gleichzeitig auftretenden Geschwindigkeiten von Massenteilen innerhalb der Lawine Ausbuchtungen an der Lawinenfront. Der die Laufzeit messende Beobachter wird diesen Unregelmäßigkeiten am ehesten gerecht, wenn er alle Frontbewegungen gedanklich zu einer vermessenen und eventuell im Hang markierten Fallinie in Beziehung setzt. Diese Linie liegt in der Mitte des Lawinenstrichs.

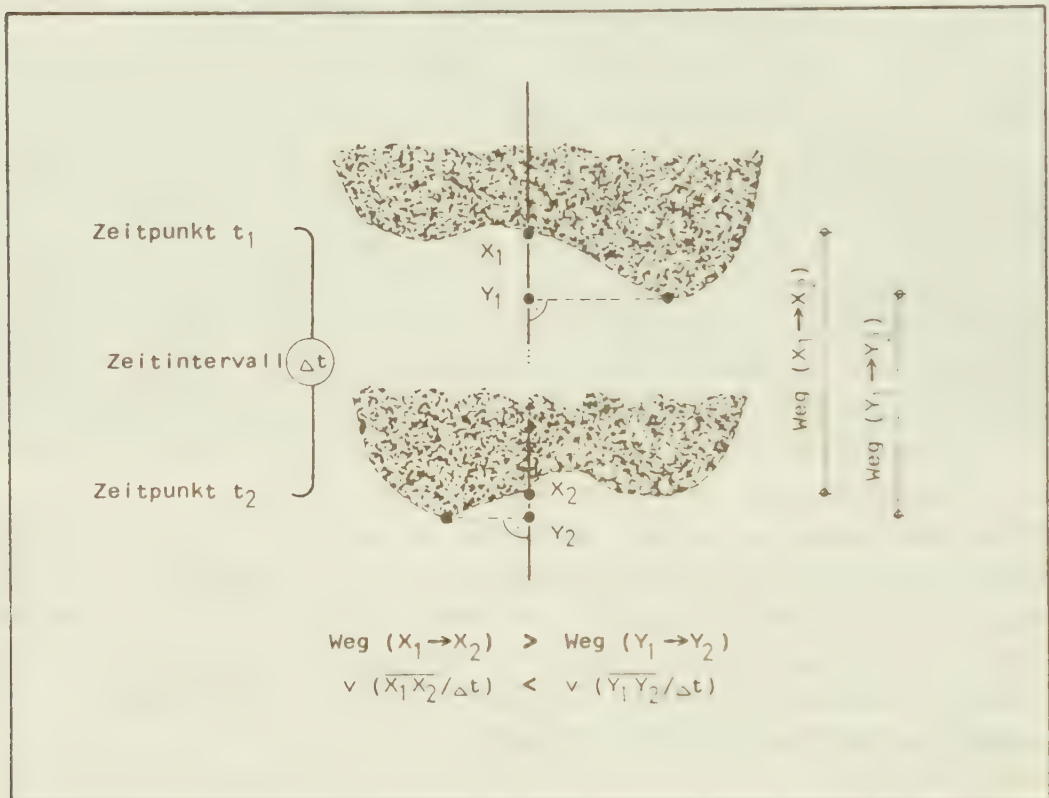


Abb.7 Zuordnungspunkte bei der Beobachtung der Lawinenfrontbewegung

Der Beobachter kann beim Messen der Frontlaufzeiten zwei verschiedene Verfahren anwenden. Entweder verfolgt er die Front im unmittelbaren Bereich der erwähnten Fallinie. Nach Abb.7 würde er dann die Laufzeit $t_1 - t_2$ der Front auf dem Wege $x_1 - x_2$ messen, ohne die seitlichen Frontvorsprünge zu berücksichtigen. Das andere Verfahren erfaßt und bewertet die am weitesten talwärts vorgedrungene Frontstelle. Diese Stelle wird - wie Abb.7 erläutert - gedanklich senkrecht auf die Fallinie projiziert. So erhält man auf der Fallinie die Projektions- und Meßpunkte y_1 zur Zeit t_1 und y_2 zur Zeit t_2 .

In der Meßpraxis hat man bisher wohl häufig unbewußt beide Verfahren angewandt. Wie man auch vorgeht, es werden stets Abweichungen der Meßwerte von der tatsächlichen Frontgeschwindigkeit auftreten. Die auf einem Lawenstrich-Abschnitt gemessene mittlere Frontgeschwindigkeit ist deshalb als ein Mittelwert mit unbekannter Streuung aufzufassen.

3.2.2 Stoppuhrmessungen

Am einfachsten sind Lawinenlaufzeiten mit der Stoppuhr zu gewinnen. Dazu bestimmt man deutlich erkennbare Geländepunkte oder bringt Beobachtungsmarken in den Lawinenhang ein. Beim meist künstlich ausgelösten Lawinenabgang wird dann die Zeit gestoppt, die die Front zum Durchlaufen der ausgewählten Meßstrecke braucht. Verwendet man parallel geschaltete Stoppuhren oder Digitalstopper mit mehreren Meßwertspeichern (z.B. HEUER REF250), so kann auch auf mehrfach unterteilten Lawinstrichen abschnittsweise gemessen werden.

Das Setzen der Markierungen und die Auswahl natürlicher Marken im Gelände beeinflussen die Meßgenauigkeit entscheidend. Im Lawenstrich stehende Markierungen ermöglichen genauere Messungen als seitlich angebrachte Peilpunkte. Andererseits sind Hindernisse, die wir in der Mitte des Lawenstrichs verankern, von den zerstörenden Wirkungen niederstürzender Schneemassen bedroht. Stabile Konstruktionen, die den Lawinen standhalten, erfordern erhebliche finanzielle Investitionen. Sie mögen jedoch dort gerechtfertigt sein, wo man umfangreichere Messungen, z.B. zusätzliche Druckmessungen, durchführen will. Wo das nicht geplant ist, dürften einfache Konstruktionen, deren Zerstörung man in Kauf nehmen kann, die bessere Lösung sein.

So brachten wir an zwei Meßlawinstrichen am Tegelberg (Ammergauer Alpen) 4 Meter lange Holzpfosten von rund 20 cm Durchmesser in den schwach muldenförmigen Lawenstrich ein. Die Pfähle wurden ohne großen technischen Aufwand im Boden verankert und talseitig abgestützt. Eine anfänglich erprobte, bergseitige Verspannung der Meßpfosten mit Stahlseilen zerstörten niedergehende Lawinen bald. Auch ohne die Seile hielten die hölzernen Markierungspfosten den dort abgesprengten Trockenschneelawinen gut stand. Allerdings erreichten die von uns dort bisher beobachteten, künstlich ausgelösten Lawinen nie Volumina über 3000 m^3 und selten Fließhöhen über 0.4 m. Die gemessenen, mittleren Bahngeschwindigkeiten lagen bei diesen Trockenschneelawinen im Maximum bei 19 m/s.

Den Belastungen größerer und kompakterer Lawinen hielten die Pfosten nicht stand. In der Regel haben feuchte bis nasse, spontan abgehende

Frühjahrslawinen die Markierungen gebrochen oder herausgedrückt. Die beschädigten Markierungsposten ließen sich aber selbst während des Winters ohne großen Aufwand ersetzen *).

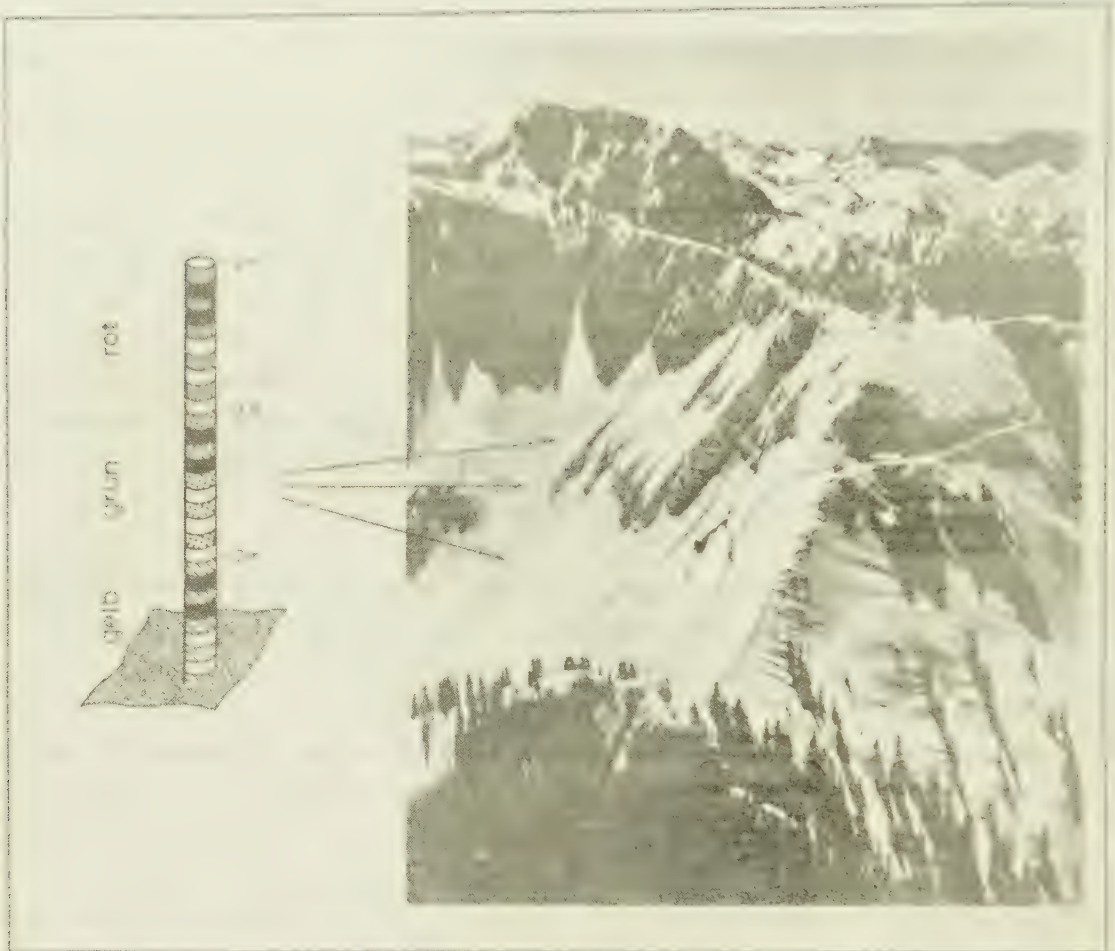


Abb.8 Meßlawinenstrich am Tegelberg (Ammergauer Alpen) mit einer Skizze der dort eingebrachten Markierungsposten

Die Abb.8 zeigt im rechten Teil den Lawinenstrich Nr.1 am Tegelberg. Links steht die Skizze eines dort eingebrachten Meßpfostens mit einer in Dezimeterabständen wechselnden Farbgebung. In der Abbildung deuten verschiedene Schraffuren auf die farbigen Ringe hin. Diese Farbgestaltung der Pfosten begünstigt das Ablesen. Sie erlaubt auch ohne optische Hilfsmittel eine relativ genaue Bestimmung der Schneehöhen im Lawinenstrich vor und nach dem Lawinenabgang. Die Fließhöhe niedergehender La-

*) Mein Dank gilt dem Leitungs- und Betriebspersonal der Tegelbergbahn AG für die uneingeschränkte Unterstützung der Forschungsarbeiten.

TEGELBERG - BRANDNERSCHROFEN		LS I
Datum: 11.03.1980	Uhrzeit: 9 ¹⁵	Beobachter: Zeuke / Gabriel
1. <u>ANRISS-SCHNEEHÖHE</u> der abgegangenen Lawine		Standpunkt: Skiabfahrt (Abzweigung Tspw.)
☐ senkrecht zum Hang ☒ lotrecht		2. <u>AUSDEHNUNG</u> der Lawinen-Anrißfläche
Anrißzone B cm Anrißzone A 20 - 30 cm		bitte schraffieren
3. <u>GESAMT-SCHNEEHÖHE</u>		4. <u>ZEIT</u> von der Detonation bis zum
vor dem Lawinenabgang nach dem Lawinenabgang		
PEGEL 1 1,70 m 1,50 m		
PEGEL 2 (defekt) m m		
PEGEL 3 2,20 m 2,00 m		5. <u>FLIEßHÖHE</u> am
6. <u>ABLAGERUNGSFRONT</u>		PEGEL 1 m 7,7 sec
		PEGEL 2 m , sec
		PEGEL 3 0,35 m 12,2 sec
146 m unterhalb Pegel 3 m oberhalb der Skiabfahrt (Böschungskante)		Lawinenstillstand:
7. <u>BEMERKUNGEN</u>		20,6 sec
150 m PEGEL 3		Locher, nigel Nacht gefallener Narschnee auf Harschunterlage

Abb.9 Aufnahmeformblatt für die Stoppuhrmessungen am Lawinenstrich "Tegelberg-Brandnerschrofen I" mit den Eintragungen einer Messung vom 11.3.80

winen konnte in seltenen Fällen, bei geringer Schneestaubentwicklung, direkt beobachtet werden. Ansonsten diene der an den Pfosten angepflasterte Lawinenschnee als Schätzhilfe.

Die Abb.9 zeigt das Aufnahmeformblatt für den Lawenstrich "LS I". Es enthält die wichtigsten, unmittelbar bei der Laufzeitmessung aufzunehmenden Daten. Aus der Lawenstrichskizze im Formblatt der Abb.9 ist zu entnehmen, daß es sich um einen kleinen Lawenstrich (Fallhöhe rund 180 m) handelt. Auf ihm gehen bei künstlicher Auslösung nur kleine Lawinen ab.

Wo größere Lawinen erwartet werden oder wo die Lawenstriche im Winter schlecht zugänglich sind, empfiehlt es sich, die notwendigen Markierungen seitlich, am Rand der Lawinenbahn anzubringen. Markante Geländepunkte können dabei dieselbe Funktion übernehmen. Es ist jedoch darauf zu achten, daß Markierungsstellen stets paarweise am linken und rechten Rand des Lawenstrichs errichtet oder ausgewählt werden. So erhält man eine Peillinie, die eine vom Beobachtungsstandpunkt weitgehend unabhängige Lagebestimmung der Front ermöglicht.

Ist man nur auf einen einzelnen Markierungspunkt angewiesen, können erhebliche Abweichungen beim Bestimmen des Zeitpunkts, zu dem die Lawinenfront diesen Punkt passiert, auftreten. In Abb.10 ist ein solches Beispiel dargestellt.

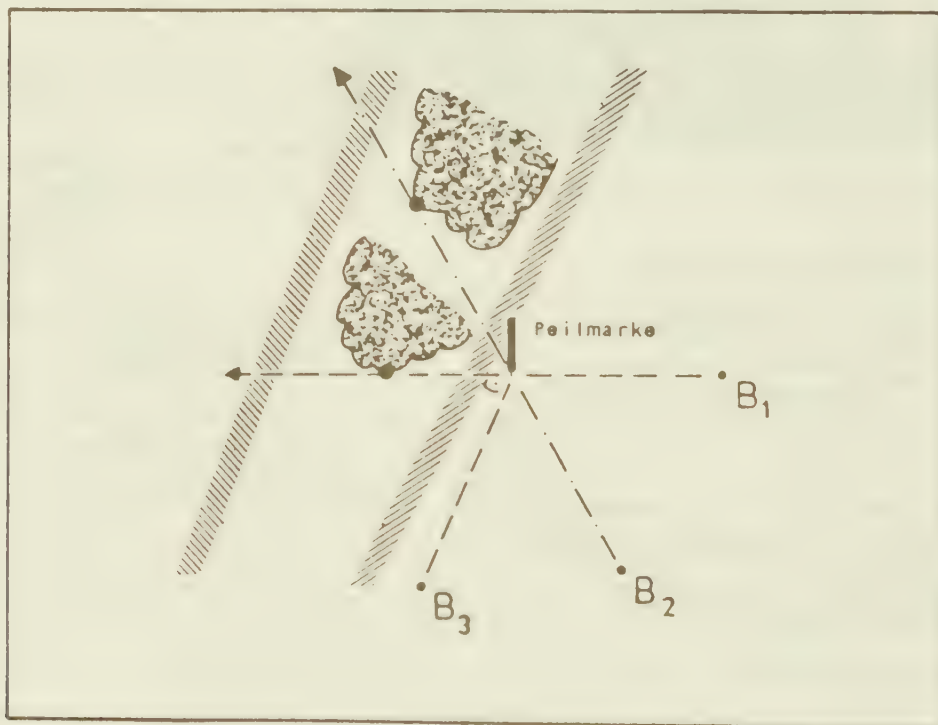


Abb.10 Schematische Darstellung der Blickrichtungen beim Visieren über einen einzelstehenden Peilpfosten

Ideal wäre der Standpunkt B_1 , da man hier auf gleicher Höhe mit dem Markierungsposten steht. Solche, auch im Winter zugängliche Standpunkte sind im Gelände nur selten zu finden. Zudem kann man bei mehreren Peilmarken im Hang immer nur an einem Markierungspunkt in dieser günstigen Position stehen. Zu einer anderen, den Abschnitt eventuell begrenzenden Marke hat man einen schrägen Blickwinkel. Das schräge Anvisieren über eine einzelstehende Peilmarke (Punkt B_2) führt zu Verzerrungen in der Beobachtung, die vielfach als Fehler in die Messung eingehen. Das ist der Fall, wenn man auf der Höhenlinienkarte oder in der Längsprofilzeichnungen der Lawinenbahn die tatsächlichen Lagepunkte der Markierungsstellen eingetragen hat und die gemessenen Zeiten auf diese Karten-Punkte bezieht. Bei Peilungen über einzelstehende Beobachtungsmarken ist es deshalb absolut notwendig, in der schneefreien oder lawinensicheren Zeit jene Geländepunkte im Lawenstrich einzumessen, die vom gewählten Standpunkt aus anvisiert werden. Dabei sind eventuelle Variationen in der Stromlinienführung der Lawine zu berücksichtigen. Die Vermessungsdaten muß man in die Kartierunterlagen eintragen.

Relativ günstig erweisen sich Beobachtungsstandpunkte, mit möglichst frontalem Einblick in den Lawinengang. Vorteilhaft sind Standorte an einem Gegenhang. Hier werden beim Anvisieren der Front, auch bei nur einzeln stehenden Markierungen, relativ geringe Fehler gemacht, da es dem menschlichen Auge anscheinend gut gelingt, die gedachte Horizontale durch den Peilpunkt zu ziehen.

Die Lawinenbeobachtung wird durch Markierungspaare, die eine wohldefinierte Peillinie vorgeben, wesentlich vereinfacht. Solche Peillinien haben wir am Garland-Lawenstrich am Nordhang des Brauneck (Bayerische Voralpen) ausgeschieden (vgl. Abb. 11) und in das Meßformblatt mit übernommen^{*)}. Als Grenzmarken der Peillinien dienten auch im Winter sichtbare Felsblöcke und einzelstehende oder sich deutlich von der Umgebung abhebende Bäume.

Peillinien sind geradlinige Verbindungen zwischen markanten Geländepunkten, die über das Geländeniveau herausragen. Wenn wir vom Beobachtungsstandort über eine Peillinie Geländepunkte im Lawenstrich anvisieren, so entspricht das einer Projektion. Wir projizieren die Peillinie in den Lawenstrich. Die gedachte Projektionslinie stimmt dabei

^{*)} Mein Dank gilt den Mitarbeitern der Brauneck Bergbahn für die Durchführung der Laufzeitmessungen am GARLAND-Lawinstrich.

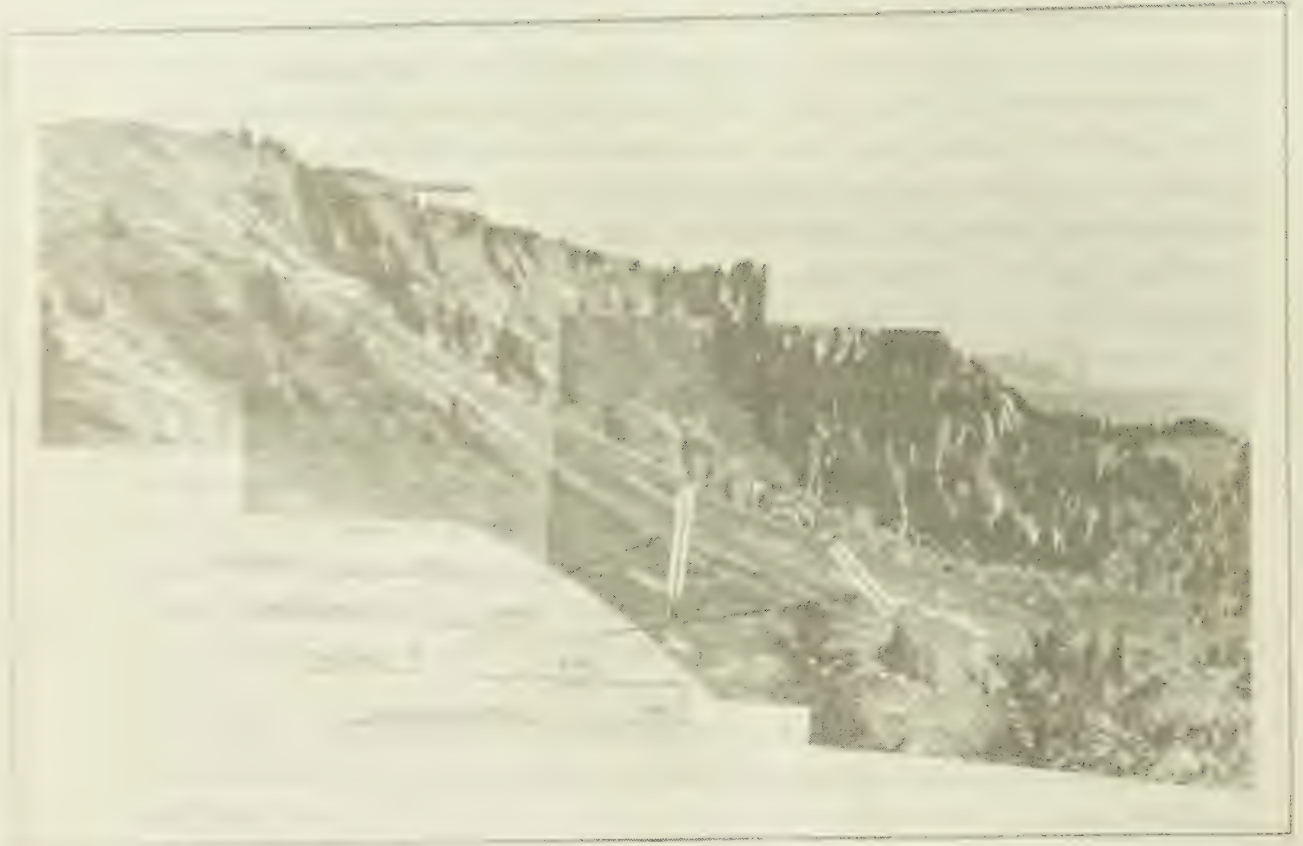


Abb.11 Ausschnitt aus dem Aufnahmeformblatt für die Stoppuhrmessungen am Lawenstrich "Brauneck-Garland" (Bayerische Voralpen) mit vorgegebenen Peillinien (Blick vom winterlichen Beobachtungsstandpunkt aus)

allerdings nicht mit der Horizontalprojektion der Peillinie überein. Deshalb dürfen wir die Peillinien und damit die Abschnittsgrenzen für die Geschwindigkeitsberechnung nicht direkt aus der Karte entnehmen. Wir müssen die anvisierte Geländelinie im Lawenstrich vor Ort bestimmen, vermessen und in eine Höhenlinienkarte eintragen. Wenn man dies versäumt, können beim Auswerten der Laufzeitmessungen gravierende Fehler auftreten. Ein Beispiel soll dies demonstrieren:

Nehmen wir an, wir hätten einen muldenförmigen Lawenstrich vor uns (Abb.12a). Auf den seitlichen Begrenzungsrücken des Lawenstrichs stünden paarweise Markierungspfosten, deren Lage in eine Höhenlinienkarte eingetragen sei (b).

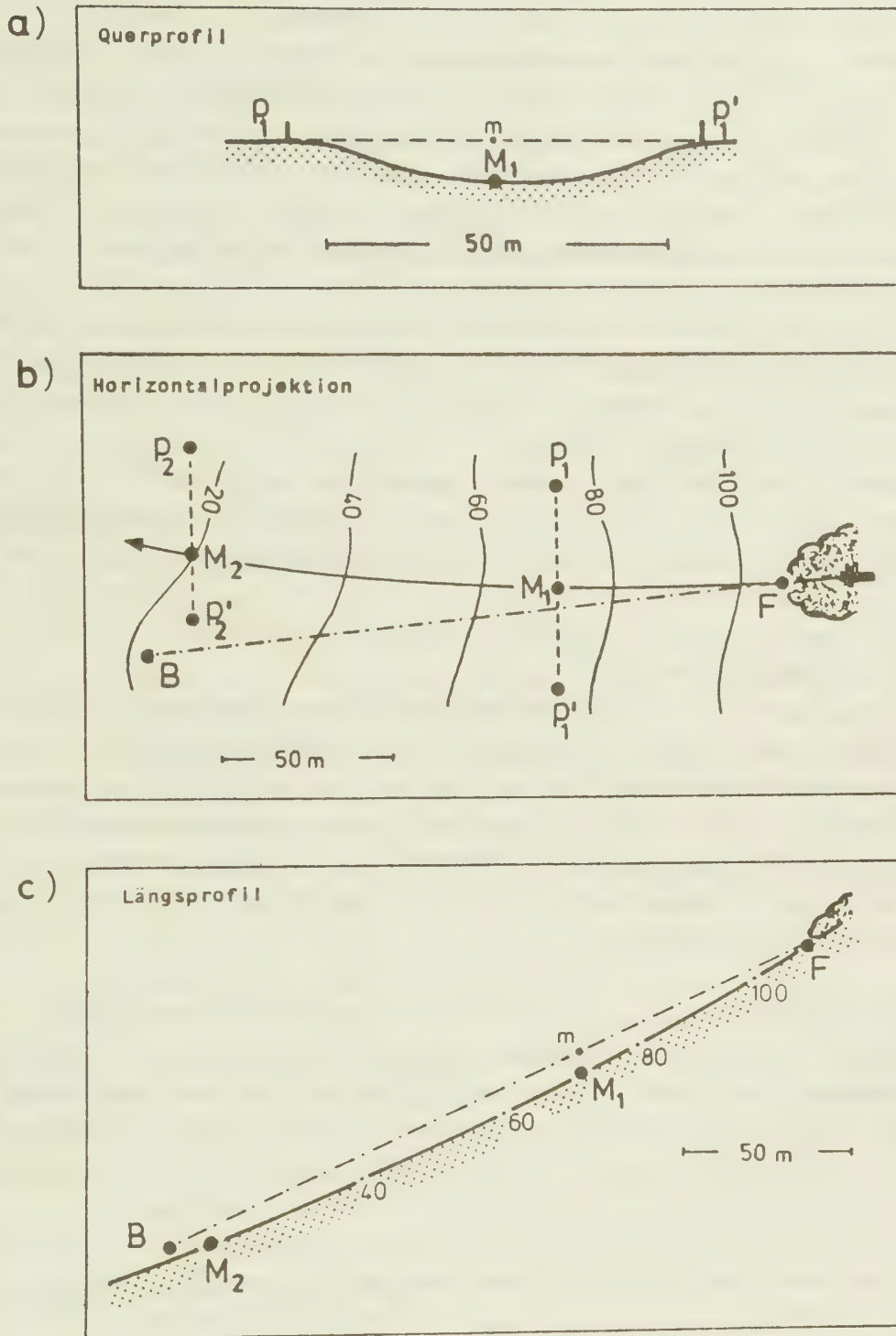


Abb.12 Graphische Darstellung des möglichen Meßfehlers in einem muldenförmigen Lawenstrichabschnitt beim Visieren über eine Peillinie, deren Markierungen auf seitlichen Gelände-
rücken angebracht sind

Bei einer Lawinenmessung läge der Standpunkt B des Beobachters etwa in Höhe der unteren Meßabschnittsbegrenzung am Rand des Lawenstrichs. Dann wird der Zeitpunkt, in dem die Lawine die Peillinie P_2-P_2' passiert, relativ genau zu bestimmen sein. Anders dagegen an der Peillinie P_1-P_1' : dort hat der bei B stehende Beobachter bereits dann den Eindruck, die Lawine habe die imaginäre Linie P_1-P_1' erreicht, wenn sich die Lawinenfront im Punkt F befindet. Die über dem Lawinenstrichniveau liegende Peillinie P_1-P_1' führt zu dieser Fehleinschätzung. Die Längsprofilardarstellung in Abb.12c zeigt den Blickrichtungsverlauf.

Berücksichtigt man beim Errechnen der mittleren Bahngeschwindigkeit diese optische Täuschung nicht, und bezieht die gemessene Zeit auf die, in die Karte eingetragene Meßstrecke M_1-M_2 , so treten mitunter beträchtliche Fehler auf.

Nehmen wir an, die Lawinenfront bewege sich mit konstanter Geschwindigkeit von 20 m/s talwärts, so braucht sie zum Durchlaufen der 200 m langen Strecke F- M_2 10 Sekunden. Ordnen wir diese Zeit fälschlich dem 120 m langen, markierten Abschnitt M_1-M_2 zu, so liefert die Auswertung eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 12m/s. Der Fehler beträgt in diesem Beispiel 40 %.

Das Beispiel der Abb.12 scheint überzeichnet, doch zeigen eigene Erfahrungen, daß besonders bei diffusem Licht im eintönig, schneebedeckten Gelände das räumliche Sehvermögen des Beobachters so stark eingeschränkt ist, daß Fehler dieser Art nicht erkannt werden und Abweichungen in der angedeuteten Größenordnung durchaus vorkommen. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, die Beobachtungslinien vermessungstechnisch zu überprüfen.

Als nachteilig erweist sich bei den reinen Stoppuhrmessungen die Abhängigkeit von der in Sekundenbruchteilen zu treffenden subjektiven Entscheidung des Beobachters. Hat die Lawinenfront den Meßpfosten oder die Peillinie wirklich im gleichen Augenblick erreicht, in dem der Beobachter seine Uhr stoppte? Eventuell auftretende Unsicherheiten können nicht korrigiert werden, da das Ereignis nicht wiederholbar ist.

Auf relativ kurzen, aufeinanderfolgenden Meßabschnitten führen geringste Abweichungen der Zeitnahme vom tatsächlichen Durchlaufzeitpunkt an der Meßmarke zu beträchtlichen Fehlern beim Errechnen der mittleren Geschwindigkeiten auf den benachbarten Streckenabschnitten. Stellen wir uns eine Lawine vor, die mit konstanter Frontgeschwindigkeit von 20 m/s zwei aufeinanderfolgende Meßstrecken von je 60 m Länge durchläuft. Jeder Abschnitt wird dann in 3 Sekunden durchfahren. Führt die Unsicherheit der Beobachtung am Markierungspunkt, der die beiden Abschnitte

trennt, zu einer zeitlichen Abweichung von 0.5 Sekunden, so liefert die Stoppuhr für den einen Meßabschnitt eine Durchlaufzeit von 3.5 Sekunden, für den anderen eine Zeit von 2.5 Sekunden. Daraus berechnet man, da man sich des Fehlers nicht bewußt ist und die Zeiten auf die ausgesteckten, 60 m langen Meßstrecken bezieht, mittlere Frontgeschwindigkeiten von $60/3.5 = 17 \text{ m/s}$ und $60/2.5 = 24 \text{ m/s}$.

Mit solchen Fehlern ist stets zu rechnen. Das Fehlerrisiko läßt sich senken, wenn man die Lawinnenniedergänge filmt und damit in gewissen Teilen eine Wiederholbarkeit des Geschehens erreicht oder wenn man über Kontakte die Stoppuhrsteuerung im weitesten Sinne der Lawine selbst überläßt. Wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, steigt dabei der notwendige technische und finanzielle Aufwand stark an und steht einer umfangreichen, breit gestreuten Datenerhebung eher entgegen. Insofern messe ich der Laufzeiterfassung mit Stoppuhren aus statistischer Sicht eine große Bedeutung zu, denn mit Hilfe der einfach zu handhabenden Stoppuhr könnten Daten im großen Umfang gewonnen und zu statistisch untermauerten Aussagen über das Lawinengeschehen verarbeitet werden.

Ein Beispiel für eine derartige Auswertung lieferte SCHÄERER (1975). Er erfaßte mit der Stoppuhr an 21 verschiedenen Hängen die abschnittsweise ermittelten Durchlaufzeiten von insgesamt 47 Fließlawinen. Die gewonnenen Daten wertete er statistisch aus. Dabei kam er über eine schrittweise lineare Regressionsanalyse zu einer Eichung der aus der VOELLMYschen Lawinentheorie (VOELLMY 1955) abgeleiteten Reibungs- und Turbulenzkoeffizienten μ und ξ . Für den Koeffizienten der trockenen Reibung (μ) ermittelte SCHÄERER einen geschwindigkeitsabhängigen Wert von $5/v$, und der Turbulenzkoeffizient ξ erreicht nach seinen Beobachtungen bei Trockenschneelawinen im Mittel einen Wert von $\xi = 1420 \text{ m/s}^2$. Diese, auf Geländemessungen beruhenden Werte wichen zum Teil erheblich von den theoretischen Vorstellungen ab, wurden aber später durch andere Berechnungen und Beobachtungen weitgehend bestätigt (LEAF und MARTINELLI 1977, BUSER und FRUTIGER 1980).

3.2.3 Messungen mit der Filmkamera

Filmt man den Niedergang einer Lawine, deren Laufzeit abschnittsweise gemessen wurde, so lassen sich die Meßergebnisse zumindest teilweise überprüfen. Aus Filmaufzeichnungen kann man ablesen, ob die Lawinenfront für den Beobachter klar zu erkennen war oder ob ein stark gebuchteter und welliger Frontverlauf im Moment der Zeitnahme zu Unsi-

cherheiten geführt haben könnte. Im vorherigen Abschnitt beschriebene fehlerhafte Peilungen (S.31 ff) bleiben jedoch meist auch bei wiederholten Filmbetrachtungen unerkant.

Der Film ist auch ein wertvolles Hilfsmittel bei der Interpretation der Meßdaten, denn er zeigt den Bewegungsablauf der Lawine im Meßintervall. So sieht man, ob die Lawinenfront die Meßstrecke annähernd gleichmäßig durchlaufen hat, ob pulsierende Frontbewegungen aufgetreten sind oder ob irgendwelche Hindernisse den Lawinenstrom beeinflusst haben. Nach eigenen Erfahrungen kann man im Gelände auf derartige Vorgänge kaum achten, wenn man sich, mit der Stoppuhr in der Hand, auf das Messen der Lawinenlaufzeiten konzentriert.

Selbstverständlich ist es auch möglich, auf die Stoppuhr zu verzichten und die Laufzeiten der Lawinenfront direkt aus dem Film zu entnehmen. Das Kameralaufwerk muß jedoch exakt gesteuert sein, damit eine konstante Bildgeschwindigkeit gewährleistet ist. Bei winterlichen Lufttemperaturen zeigen handelsübliche Filmkameras aber häufig Laufschränkungen, die den Einsatz der Kamera als Zeitmessgerät nicht gerechtfertigen. SHODA (1966) und JOETSU (1971) verwendeten deshalb für derartige Laufzeitmessungen eine spezielle, quarzgesteuerte BOLEX-Filmkamera, deren Bildfolge auf 120 Meter Film maximal um 1 Bild vom Sollwert abwich. Damit waren Zeitmessungen mit großer Genauigkeit möglich.

Eine andere technische Lösung besteht im elektronischen Messen und Speichern der Zeitabstände von Bild zu Bild. Damit ist man unabhängig von Kameras mit Präzisionslaufwerk. Eventuell auftretende Laufschränkungen können erfaßt und bei der Lawinenlaufzeitmessung mit berücksichtigt werden. Die in Abschnitt 3.4.2 beschriebene Meßtechnik benutzt dieses Prinzip der zeitlichen Intervallmessung zwischen den einzelnen Filmbildern.

Die Messungen mit der Filmkamera kann man, je nach den örtlichen Gegebenheiten und nach den vorgegebenen Zielvorstellungen mit einer freien, starren oder abschnittsweise vorrückenden Kameraführung ausüben.

Bei der freien Kameraführung übernimmt der Film eine Kontrollfunktion. Der Lawinenhang muß mit Markierungs- und Peilmarken versehen sein, und die Filmaufzeichnung dient, wie das menschliche Auge, dazu, den jeweiligen Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die Lawinenfront die Markierungen passiert. Die Wahl des Bildausschnittes und die Art der Filmgestaltung bleibt weitgehend dem Beobachter überlassen. Auch die Wahl des Standpunktes unterliegt keinen meßtechnischen Anforderungen. Allerdings sind die in Abschnitt 3.2.2 geschilderten Fehlergefahren bei schräger Peilung zu berücksichtigen. Die Meßfilme SHODAs (1966) sind Beispiele dieser Meßtechnik.

Die Auswertbarkeit des Filmes nimmt bei starrer Kamerahaltung zu. Dabei wird die Filmkamera fest installiert und starr auf einen Teilbereich des Lawenstriches gerichtet. Der Standpunkt sollte so gewählt werden, daß man frontal auf den Lawinenhang blickt oder daß man seitlich neben dem Lawenstrich steht und senkrecht zur Fließrichtung filmt. Weil die Kamera bei dieser Methode nicht bewegt und auch die Brennweiteinstellung nicht verändert wird, bleiben Entfernungen zwischen im Bild erkennbaren, markanten Punkten während des Beobachtungszeitraumes konstant. Diese konstanten Verbindungslinien zwischen solchen Punkten dienen als Referenzlinien zum weiteren Untergliedern der Meßstrecke. So erhält man eine, im Gelände nicht notwendigerweise zu markierende Unterteilung eines Lawenstrichabschnittes, für den die Lawinenfrontbewegung relativ exakt beschrieben werden kann.

Ein Beispiel für die, mit starrer Kameraführung analysierte Frontbewegung einer Lawine in einem Teilbereich des Lawenstrichs findet man bei SHIMIZU u.a.(1980). Die Autoren verwendeten für ihre Untersuchung eine Super-8-Schmalfilmkamera. Der Nachteil der starren Kamerainstallation liegt im allgemeinen in der Begrenzung des aufnehmbaren Lawenstrichausschnittes durch den Bildausschnitt der Kamera. Dieser Nachteil kommt auch in der Fig.6 bei SHIMIZU zum Ausdruck.

Die abschnittsweise vorrückende Kameraführung verbindet Vorteile der starren und freien Kameraführung. Bei dieser Technik wählt man über den ganzen Lawinenhang verstreute Markierungspunkte aus. Die Anzahl der bei der Messung verwendbaren Punkte hängt von der Länge des Lawenstriches und von der Geschwindigkeit der niedergehenden Lawine ab, denn man muß die Kamera auf den jeweiligen Peilpunkt gerichtet haben, bevor die Lawine diese Geländestelle erreicht hat. Im einzelnen sieht der Meßablauf so aus: Zunächst fixiert man mit der Kamera den obersten, ausgewählten Markierungspunkt. Nachdem die ausgelöste Lawine diesen Punkt durchlaufen hat, zieht man die Kameranach und richtet sie auf einen tiefer gelegenen, von der Lawine noch nicht erreichten Peilpunkt. Wenn die Lawine auch an dieser Stelle vorbeigeströmt ist, setzt man die Kamera weiter unten an, und so weiter bis zum Stillstand der Lawine. So kann man einen Überblick über die gesamte Lawinenbahn gewinnen. Beim Filmen ist darauf zu achten, daß die Brennweiteinstellung während der gesamten Messung nicht verändert wird.

Als Ergebnis erhält man die Zeitpunkte, zu denen die Lawinenfront die vorher anvisierten Peilpunkte erreicht. Zusätzlich erlaubt die kurzzeitig starre Kameraeinstellung im Bereich der Geländemarken eine differenziertere Geschwindigkeitsbetrachtung. An Hand eines Meßbeispiels soll das im folgenden erläutert werden.



Abb.13 Lawenstrich "Vogelsgern" (Allgäuer Alpen) mit
eingezeichneten Peillinien

Die Abb.13 zeigt einen Lawenstrich am Schattenberg (1842 mNN) bei Oberstdorf. Die dargestellte, süd-südwest-exponierte Bergflanke trägt den Lokalnamen "Vogelsgern". Größere Lawinen vom Vogelsgern gefährden den Fahrweg ins Oytal. Deswegen versucht man bei großer Lawinengefahr die dort drohenden Lawinen kontrolliert, das heißt nach vorheriger

Sperrung der gefährdeten Bereiche, auszulösen. Die Sprengungen am Vogelsgern erfolgen vom Hubschrauber aus.

Die im folgenden kurz beschriebene Lawine wurde am 21.1.81 gegen Mittag gesprengt. Es löste sich ein Schneebrett mit einer Anrißdicke zwischen 1 und 1.5 Metern und einem geschätzten Volumen von 70000 m^3 . Das Raumgewicht des angerissenen Schnees dürfte rund 250 kg/m^3 betragen haben. Die Schnee-Vergleichsdaten stammen von der 2 km entfernten Meßstation Nebelhorn (2068 mNN) des Bayerischen Lawinenwarndienstes.

Diese Lawine wurde gefilmt. Dem Film konnte man die Laufzeiten für einzelne Bahnabschnitte entnehmen. Die Meßintervalle sind in Abb.13 durch die Peillinien (1) bis (7) voneinander getrennt. Unterhalb der Markierung (7) ist der Lawenstrich vom Beobachtungsstandpunkt aus nicht mehr einzu- sehen.

In der Abb.14 findet man die Peilpunkte im Längsprofil des Lawenstrichs wieder. Für die einzelnen Bahnabschnitte sind im unteren Teil der Abbildung die errechneten mittleren Geschwindigkeiten der Lawenfront durch eine dick ausgezogene Linie graphisch dargestellt.

Im Bereich der Peillinien lieferte die Filmauswertung zusätzliche Geschwindigkeitsangaben, die im Diagramm als gepunktete Säulen aufschei- nen. Die Breite dieser Säulen entspricht nicht den zugehörigen Meßbe- reichen. Es läßt sich nur sagen, daß die Front auf kurzen Teilstrecken vor oder nach der Peillinie (meist $\pm 20\text{-}40\text{m}$) die durch die Säulenhöhe angegebenen mittleren Frontgeschwindigkeiten aufwies. Wie man zu diesen zusätzlichen Informationen kommt, soll am Meßabschnitt (2) - (3) erläutert werden:

Der Meßabschnitt (2) - (3) hat bei annähernd konstanter Neigung von 38° eine Länge von 140 m. Auf die Leinwand projeziert maß diese Strecke 60 cm. Betrachten wir jetzt die Vorgänge zu einem Zeitpunkt, an dem die Kamera mit der Suchermitte auf die Peillinie (3) gerichtet war, um dort das Durchlaufen der Lawenfront zu erfassen. Nachdem die Front auf der Leinwand 14.5 cm oberhalb der Peillinie (3) zu erkennen war, erschien sie noch auf den folgenden 18 Filmbildern, bis sie die Peillinie (3) erreicht hatte. Eine Folge von 18 Bildern entspricht einer Zeitspanne von 0.75 Sekunden und auf der Leinwand in diesem Fall der erwähnten Distanz von 14.5 cm. Wir wollen überlegen, welcher Strecke diese 14.5 Zentimeter im Gelände entsprechen.

Da der Beobachtungsstandpunkt über 2000 m vom Lawenstrich entfernt lag, darf man für die Berechnung vereinfachend einen parallel verlau-

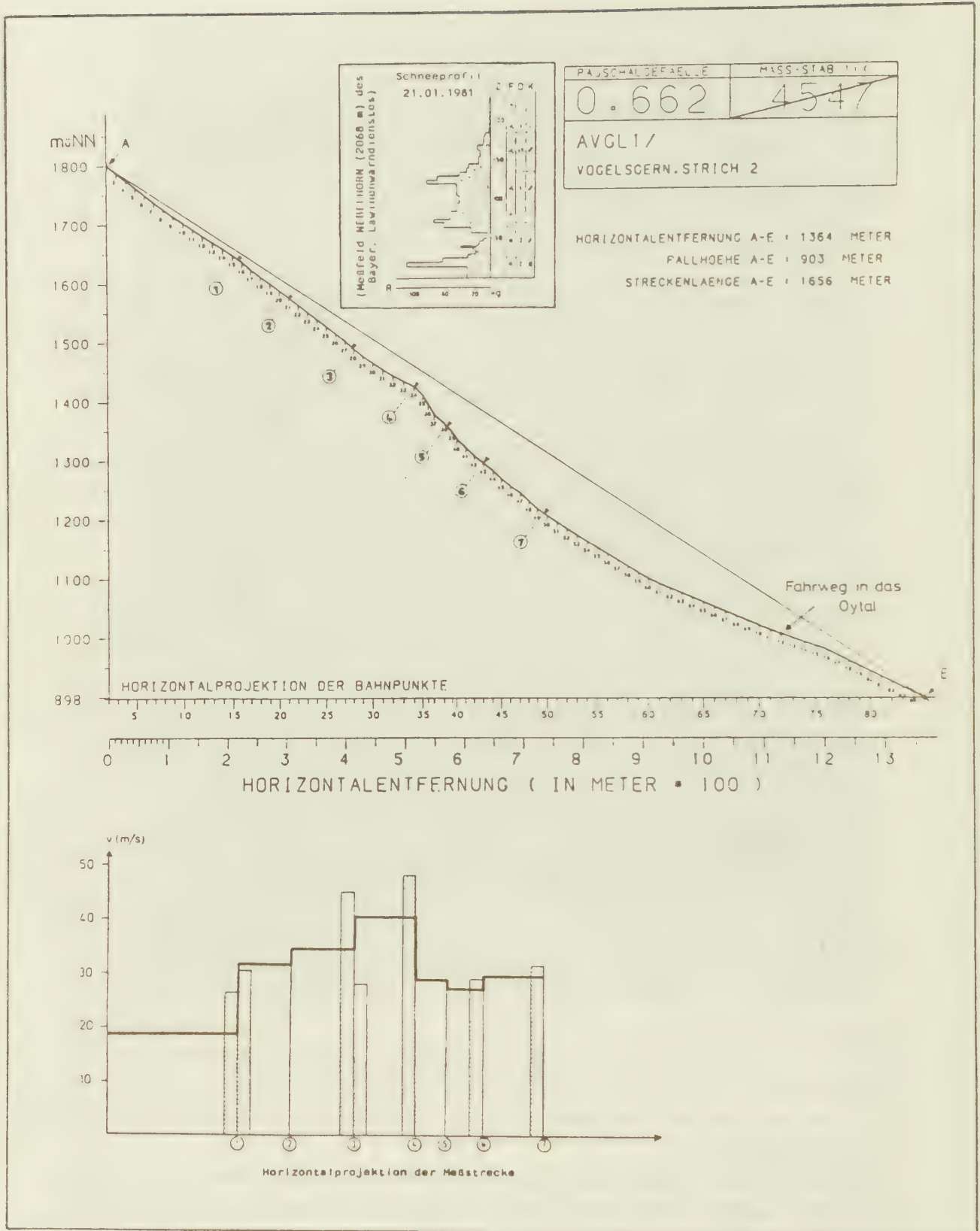


Abb.14 Längsprofil des Lawinenstrichs "Vogelsgrern" (vgl.Abb.13). Die stark ausgezogene Linie des unten dargestellten Geschwindigkeitsdiagramms stellt die mittleren Frontgeschwindigkeiten für die einzelnen Teilstrecken dar. Die punktierten Säulen geben die Frontgeschwindigkeit kurz vor und nach dem Durchlaufen der Peillinien an.

fenden, optischen Strahlengang unterstellen. Dann sind die mathematischen Strahlensätze anwendbar, und man erhält die Gleichung

$$\frac{60 \text{ cm}}{14.5 \text{ cm}} = \frac{140 \text{ m}}{x \text{ m}}$$

mit der Lösung $x = 34 \text{ m}$.

Für diese 34 m lange Teilstrecke bis zur Peillinie 3 benötigte die Lawinenfront, wie angegeben, 0.75 Sekunden, woraus sich für den Teilabschnitt eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 45 m/s errechnen läßt. Dieser Geschwindigkeitswert ist im Diagramm der Abb.14 als punktierter Balken eingezeichnet.

Berücksichtigt man den nicht parallelen Verlauf des Strahlenganges und die daraus resultierenden Winkelverzerrungen, so erhält man eine Korrektur der Teilstrecke x im Kommastellenbereich.

Der Lawinenstrich "Vogelsgern" ist reich an markanten Geländepunkten (vgl. Abb.13), so daß mit dieser Meß- und Auswertetechnik noch bessere und detailliertere Ergebnisse zu erzielen wären, als in Abb.14 angegeben. Am Standort der Abb.13 haben wir die Meßmethode mit der abschnittsweise vorrückenden Kameraführung nicht weiter angewandt. Die hier vorgestellte Messung war nur ein Zwischenschritt zu einer weiter verfeinerten Filmmeßtechnik, die den Geschwindigkeitsverlauf in sehr kleinen Meßintervallen fortlaufend wiedergeben kann. Diese, der kontinuierlichen Laufzeitmessung zugeordnete Methode ist in Abschnitt 3.4.2 beschrieben.

3.2.4 Messungen über terrestrische Photogrammetrie

Der Auswertung von Filmaufzeichnungen sind Grenzen gesetzt. Die Filmbilder erlauben nur entlang einer oder in Sonderfällen mehrerer, vorgegebener Längsprofilinien die Lage der Front zu bestimmen und daraus ihr Geschwindigkeitsverhalten abzuleiten. Für andere Bereiche des Lawinenstrichs, die nicht durch Vermessungslinien charakterisiert sind, können keine Aussagen getroffen werden.

Im Vergleich mit der Filmaufzeichnung bietet die terrestrische Photogrammetrie größere Möglichkeiten. Mit paarweise durch 2 Kameras aufgenommene Serien von Stereobildern kann man die Geländesituation vor und nach dem Lawinenniedergang exakt beschreiben und kartographisch darstellen. Man kennt dann den Lawinenstrichzustand zum Zeitpunkt des Lawinenereignisses sehr genau. Das aufwendige Vermessen des Geländeprofiles, das meist nur Daten des Sommerzustandes des Lawinenstrichs liefert, entfällt. Ein Beispiel für die detaillierte, photo-

grammetrisch erarbeitete Zustandserfassung eines Lawinenhanges findet man bei VanWIJK (1967). Während des Lawinenereignisses gestatten die stereophotogrammetrischen Aufnahmen das Bestimmen der Lawinenumrisse an der Front und an den Flanken. Durch Vergleich der Lawine mit der Topographie des Lawenstrichs vor dem Meßereignis kann zusätzlich für jede Momentaufnahme die Fließhöhe und damit das Lawinenvolumen geschätzt werden (VanWIJK 1967).

Eine ausführliche Beschreibung der stereophotogrammetrischen Meßapparatur, der erzielbaren Meßgenauigkeiten, der Anwendungstechnik und des Auswertprinzips gibt BRIUKHANOV (1968). Eine Reihe von Meßbeispielen vervollständigen den dort gegebenen Überblick über die Nutzung der terrestrischen Photogrammetrie für die Lawinenbeobachtung.

Hier soll nur auf einige grundlegende, für die statistische Analyse und für den Vergleich mit anderen Methoden wichtige Punkte eingegangen werden.

Anders als bei den bisher beschriebenen Verfahren geht man bei der photogrammetrischen Methode von vordefinierten Zeitintervallen aus und bestimmt die Strecken, die von der Lawinenfront in diesen Zeitspannen zurückgelegt werden. Als Ergebnis erhält man für die einzelnen Teilstrecken die mittlere Geschwindigkeit der Lawinenfront. Die, durch den Zeitaufwand für den Filmtransport in den Kameras bedingte, minimale Länge der Zeitintervalle beträgt bei BRIUKHANOV (1966,1968) 2 Sekunden, bei VanWIJK (1967) 1.8 Sekunden. Da bei günstiger Aufstellung der beiden Photokameras der gesamte Lawenstrich überblickt wird, erhält man mitunter eine sehr detaillierte, abschnittsweise Unterteilung des Lawenstriches. Auf einem fast 1000 m langen Lawenstrich konnte BRIUKHANOV bis zu 50 Meßabschnitte ausscheiden und für jedes Meßintervall die mittlere Frontgeschwindigkeit bestimmen (BRIUKHANOV 1968, Tab.IIB). Die größten Abschnitte hatten bei Maximalgeschwindigkeiten von rund 28 m/s eine Länge von 55 m. In der Start- und Bremsphase der Lawinenbewegung ergaben sich Meßintervalllängen von weniger als 5 m.

Die photogrammetrische Meßtechnik gibt das Geschwindigkeitsverhalten der Lawinenfront also sehr differenzierender wieder. In sämtlichen Meßbeispielen BRIUKHANOVs kommt dabei das in Abschnitt 2.4 erwähnte Pulsieren der Lawinenfront zum Ausdruck (vgl. auch Abb.27 auf S.90). Auch VanWIJK belegt durch photogrammetrische Analysen die Geschwindigkeitschwankungen an der Front einer Lawine.

Mit Hilfe der terrestrischen Photogrammetrie können auch Querbewegungen an den Frontflanken und die seitliche Ausbreitungsdynamik von Lawinen studiert werden.

Trotz dieser vielseitigen Möglichkeiten einzelne Lawinenereignisse zu erfassen, scheint die stereophotogrammetrische Meßmethode allein wenig geeignet, ein breites Spektrum von Lawinengeschwindigkeitsdaten zu sammeln. Die Installation der Meßapparatur im Gelände erfordert viel Zeit, da die Kamerastandpunkte genau eingemessen und die Geräte exakt justiert werden müssen. Das zwingt dazu, sich mit der Arbeit auf einige wenige, vorgewählte Lawinenstriche zu konzentrieren. Die Auswahl eines Lawinenstriches wird dabei weitgehend durch die Geländeverhältnisse bestimmt, denn die parallel geschalteten, durch einen Oszillographen gesteuerten Kameras sollen auf einer horizontalen Basis stehen mit möglichst horizontalem Blick auf den Lawinenhang. Für den Abstand der Kameras auf der Basislinie gibt BRIUKHANOV (1968) die Abschätzformel

$$\text{minimaler Basisabstand} = Y_{\max}/10$$

an, worin $Y_{\max}$ die Horizontaldistanz zwischen Anrißpunkt der Lawine und Kamerastandort ist (vgl. Abb.15). Das heißt, wenn $Y_{\max}$ 2000 Meter mißt, was bei größeren Lawinenstrichen durchaus realistisch ist, müssen die Kameras mindestens 200 m auseinander stehen.

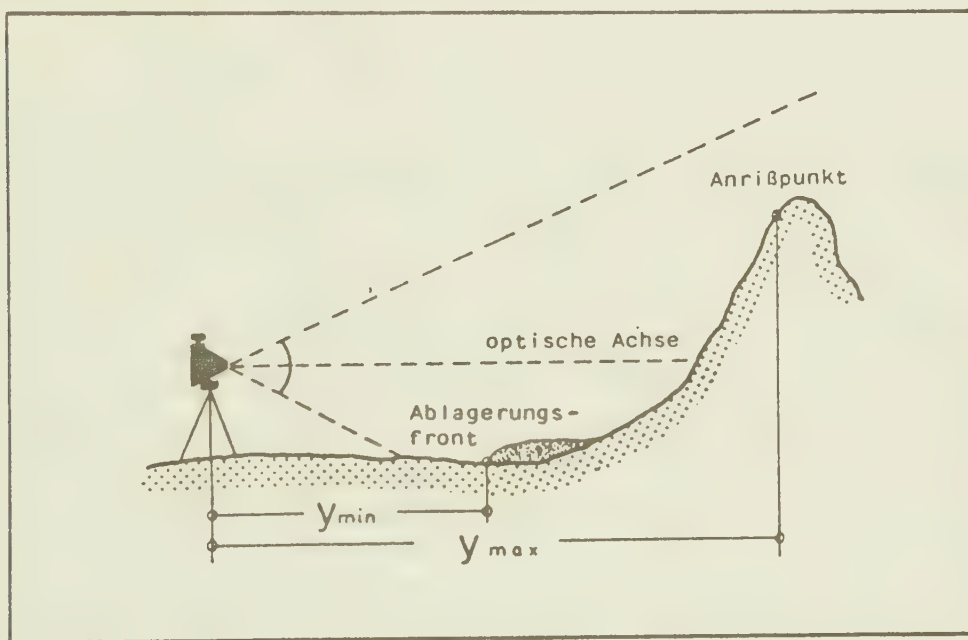


Abb.15 Schema der Kameraaufstellung für die terrestrisch-photogrammetrische Lawinenbeobachtung (nach BRIUKHANOV 1968, Fig.7)

Um auch in der Ablagerungszone photogrammetrische Auswertungen durchführen zu können, ist vom Auslaufgebiet der Lawine ein Mindestabstand $Y_{\min}$ vom Dreifachen der Basislänge einzuhalten. In dem Zahlenbeispiel bedeutet dies, daß die 200 m lange Basislinie etwa 600 m vom Auslaufbereich der Lawine entfernt sein müßte.

Die geographischen Gegebenheiten im Alpenraum und insbesondere in den nördlichen Kalkalpen lassen für einen derartigen Meßaufbau wenig Raum. Um die Vorteile der dreidimensionalen photogrammetrischen Betrachtung dennoch zu nützen, wäre es denkbar, diese Meßtechnik nur in Teilbereichen des Lawenstrichs einzusetzen, während im übrigen das Geschwindigkeitsverhalten mit anderen Methoden, etwa mit einer Filmmessung, beobachtet wird.

Die Entzerrung und Auswertung der terrestrischen Stereoaufnahmen ist aufwendig und nur mit speziellen Geräten durchführbar (z.B. ZEISS C-8-Stereoplanigraph).

Jede Lawinenbeobachtung und -messung mit Film- und Photokameras verlangt gute Sichtverhältnisse. Das ist bei allen optischen Verfahren ein Nachteil, der die Meßmöglichkeiten stark einschränkt und erfolgreiche Messungen nur relativ selten gelingen läßt. Deshalb entwickelte man Methoden, bei denen die Steuerung der Zeitnahmen direkt oder indirekt von der Lawine ausgelöst wird.

3.2.5 Messungen mit automatischer Steuerung der Zeitnahme

Das Grundprinzip dieser Meßmethode besteht darin, Steuerungsmechanismen im Hang zu installieren, die von den niederstürzenden Lawinen betätigt werden. Dadurch wird der Augenblick des Eintreffens der Lawinenfront am Meßpunkt sehr genau erfaßt. Als Kontaktgeber dienen Schalthebel (KRONFELLNER-KRAUS 1979) und Druckaufnehmer (SHIMIZU u.a. 1980, SCHAERER u. SALWAY 1980). Auch seismische Geophone zeigen das Eintreffen der Lawine für einen bestimmten Punkt des Lawenstriches an und können deshalb ebenfalls zur Laufzeitmessung verwendet werden (SALWAY 1978, SCHAERER u. SALWAY 1980). Man erhält bei diesen Meßmethoden im allgemeinen die mittleren Geschwindigkeiten der Lawinenfront. Zeichnet man die Signale der Drucksensoren oder Geophone kontinuierlich auf, so können daraus zusätzlich Rückschlüsse auf das Geschwindigkeitsverhalten einzelner Massenteile in der Lawine gezogen werden (SHIMIZU 1980, SCHAERER u. SALWAY 1980).

Das Meßverfahren ist vollständig automatisierbar, so daß auch Messungen an spontan abgehenden Lawinen möglich sind.

Ähnlich wie bei der photogrammetrischen Methode ist der finanzielle und technische Aufwand bei derartigen Verfahren sehr groß. Es wäre deshalb nicht gerechtfertigt, sie ausschließlich zum Gewinnen von abschnittsweisen Mittelwerten der Frontgeschwindigkeit einzusetzen, zumal nur an besonders präparierten Lawenstrichen gemessen werden kann.

Um der Lawine die Steuerung der Zeitnahme zu überlassen, sind die Kontaktgeber in den Lawinenhang einzubringen. Dazu müssen die Instrumente so konstruiert, geschützt und im Lawinenstrich verankert sein, daß sie den Lawinenbelastungen standhalten. Als Träger für die Schalter und Druckaufnehmer verwendet man meistens Stahlrahmen oder Stahlbetonkonstruktionen. Die Dimensionierung der Trägersysteme hat sich dabei an der örtlich möglichen Extremlawine zu orientieren. Daß diese Abschätzung mitunter schwierig ist und Fehlbeurteilungen vorkommen, zeigt ein Beispiel aus dem Kurobe Canyon (Japan), wo ein Teil der Meßanlage, die über Jahre hinweg hochinteressante Meßwerte über Lawinengeschwindigkeiten und -druckkräfte lieferte, Ende 1980 von einer Lawine weggerissen wurde (WAKAHAMA 1982).

Seismische Geophone machen Tragegerüste überflüssig. Die Geophone werden etwa 15 cm tief im Untergrund des Lawinenstrichs vergraben. Damit verringert sich die Gefahr der Zerstörung der Meßeinrichtung durch Lawinen wesentlich. Außerdem ist der Lawinenstrich frei von künstlichen Hindernissen, die gerade die Messungen kleinerer Lawinen störend beeinflussen können. Die Wahl geeigneter Lagepunkte der Geophone kann schwierig sein, da die Geräte gegenüber Umweltgeräuschen und vom Lawinengeschehen unabhängigen Vibrationen abgeschirmt sein müssen. Andererseits müssen sie ausreichend sensibel sein, um das Ankommen und Vorbeiströmen der Lawine beschreiben zu können. Dabei ist auch die puffernde Wirkung der im Lawinenstrich liegenden Schneedecke zu beachten.

Die Messung mit automatischer Zeitnahmensteuerung verlangt im allgemeinen den Einsatz technisch hoch entwickelter Meß- und Aufzeichnungsgeräte. Da die Instrumente oft empfindlich gegenüber Feuchtigkeit, Regen, Frost oder Vibrationen sind, ist die Ausfallquote sehr hoch. SCHAERER u. SALWAY (1980) schlagen deshalb vor, die doppelte Anzahl der erforderlichen Meßgeräte im Lawinenstrich zu installieren.

Auch die Verbindungen zwischen den Kontaktgebern im Lawinenstrich und der Registrierstelle, die abseits an geschützter Stelle zu errichten ist, müssen sorgfältig vor Beschädigungen geschützt werden. Der Ausfall einer einzigen Verbindungsleitung kann unter Umständen die gesamte Meßanlage für den Rest des Winters stilllegen.

Um nicht nur künstlich ausgelöste Lawinen zu erfassen, muß eine derartige Meßanlage ständig betriebsbereit gehalten werden. Das wirkt mitunter Probleme in der Energieversorgung auf (KRONFELLNER-KRAUS 1979). Leistungsfähige Generatoren oder der Anschluß an ein bestehendes Stromnetz sind erforderlich. Damit wird aber die Wahl möglicher Meßlawinenstriche erheblich eingegengt.

In Österreich wurden in den vergangenen Jahren an zwei Lawinenstrichen derartige, über Schalthebel gesteuerte Meßanlagen installiert^{*)}. Die Geschwindigkeitsmessungen an Lawinen sind dabei aber nur ein kleiner Bereich des gesamten Beobachtungsprogrammes. In erster Linie versucht man mit der automatischen Anlage die Bedingungen zu untersuchen, unter denen es zu einem Lawinenabgang kommt. Deswegen bilden Temperatur-, Strahlungs- und Verdunstungsmessung, das Beobachten der Windverhältnisse und die Überwachung der Schneehöhen und des Schneedeckenaufbaus das Kernstück der Versuchsanlage.

In Nordamerika und Japan wird die automatische Zeitnahmesteuerung bereits seit vielen Jahren mit gutem Erfolg eingesetzt (vgl. auch Abschn.3.3.1).

Da die Geschwindigkeitsmessungen mit automatischer Zeitnahmesteuerung sehr aufwendig sind, scheinen sie grundsätzlich wenig geeignet, umfangreiches und breitgestreutes Datenmaterial zu sammeln. Es fällt jedoch auf, daß ein Großteil interessanter Informationen über die Bewegung von Lawinen aus solchen Messungen stammt (SHIMIZU u.a.1972-1976, SCHAEERER u.SALWAY 1980, EYBERT-BERARD 1977). Der Grund dafür liegt im allgemeinen in einer Ergänzung der abschnittsweisen Meßergebnisse durch punktuelle Geschwindigkeits- und Druckmessungen (vgl. Abschn.3.3). Hinzu kommt meines Erachtens ein organisatorischer, teilweise sogar psychologischer Gesichtspunkt: Dort nämlich, wo man mit großem technischem und finanziellem Aufwand Lawinengeschwindigkeiten mißt, gelingt es leichter als beim Einsatz einfacher Meßmethoden, Bergbahnbetriebe und Behörden zur Mitarbeit zu gewinnen und etwaige Interessenskonflikte zugunsten der Lawinenmessung zu lösen.

Die bislang beschriebenen Verfahren der abschnittsweise durchgeführten Laufzeitmessung werden im allgemeinen dazu eingesetzt, die mittleren Geschwindigkeiten für Teilstrecken von mehreren Metern bis zu einigen hundert Metern Länge zu erfassen. Mit Hilfe automatisch gesteuerter Zeitmeßanlagen ist es allerdings auch möglich, die Geschwindigkeiten für sehr kurze, wenige Meter oder Dezimeter lange Meßstrecken zu gewinnen. Die Geschwindigkeitswerte haben dann den Charakter punktueller, d.h. für bestimmte Bahnpunkte geltender Meßwerte.

^{*)} Mündliche Mitteilung von Herrn Hofrat Dr. Kronfellner-Kraus

Veröffentlichungen über Laufzeitmessungen auf sehr kurzen Meßstrecken liegen bislang nur von SHIMIZU u.a.(1980) vor. Die japanischen Wissenschaftler installierten zwei kontinuierlich aufzeichnende Druckmeßgeräte im Abstand von 45 cm auf einem, im Lawenstrich stehenden Stahlbetongerüst. Die Drucksensoren wurden leicht versetzt hintereinander gestellt. Beim Niedergang einer Trockenschneelawine lieferten die Meßgeräte graphische Aufzeichnungen der aufgetretenen Druckbelastungen. Die Schwankungen der Meßwerte sind groß, da die Druckanzeige auf den Aufprall einzelner, im feindispersen Schnee-Luft-Gemisch mitgeführten Schneeaggregate reagiert. Die Aufzeichnungskurve nimmt daher einen sehr unruhigen Verlauf (vgl. Abb.16).

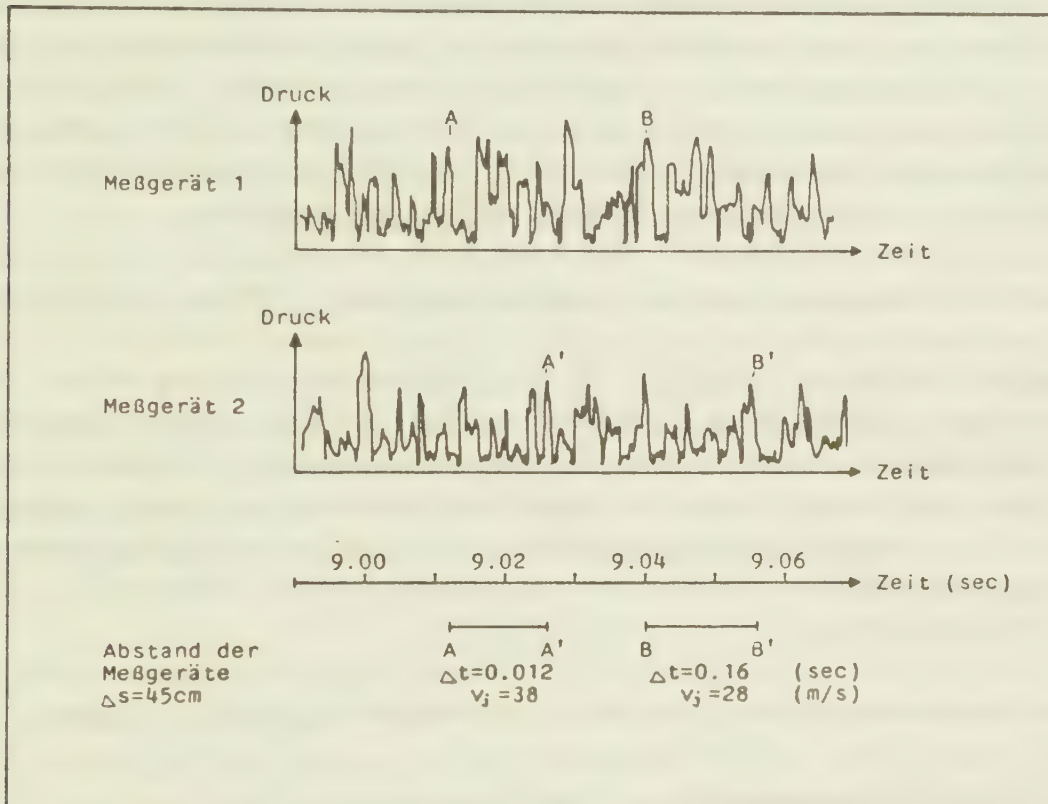


Abb.16 Das Abschätzen der Geschwindigkeiten einzelner Massenteile in einer Lawine aus der Vergleich zweier Druck-Zeit-Diagramme (in Anlehnung an die von SHIMIZU u.a.(1980) durchgeführten Messungen)

Die Absolutbeträge der gemessenen Druckbelastungen bleiben beim Ermitteln der Geschwindigkeiten einzelner Massenteile unberücksichtigt. Man vergleicht nur die Muster der Aufzeichnungsdiagramme von den wenige Dezimeter auseinanderstehenden Meßgeräten. Dabei ist keine vollständige Ähnlichkeit der Meßkurven zu erwarten, denn ein Schneeaggregat, das den ersten Druckaufnehmer getroffen und damit einen Kurvenausschlag (Peak) erzeugt hat, kann am zweiten Meßgerät vorbeifließen und umgekehrt. Bei

sehr kurzen Distanzen der Meßgeräte treffen aber noch ausreichend viele Massenteile beide Geräte, so daß sich Analogien in den Aufzeichnungsmustern ergeben. Aus der zeitlichen Versetzung der aufgetretenen, identifizierbaren Peaks kann man so die Geschwindigkeiten einzelner Massenteile bestimmen. In Abb.16 ist das Vorgehen graphisch erläutert.

SHIMIZU und Mitarbeiter konnten bei ihren Messungen verschiedene Peaks miteinander korrelieren und daraus Geschwindigkeiten ableiten. Die gefundenen Werte schwankten zwischen 9 und 61 m/s. Diese Meßwerte zeigen deutlich, daß dieses Verfahren nur die punktuellen Geschwindigkeiten einzelner Massenteile liefert, die in einer schnellen Trockenschneelawine durchaus im angegebenen Rahmen variieren können.

Vergrößert man den Abstand der Meßgeräte, so nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, daß bestimmte Massenteile beide Drucksensoren treffen. Dies gilt insbesondere für turbulente Bewegungsformen. Damit wird es schwieriger, einzelne Kurvenausschläge miteinander zu korrelieren. Die Geschwindigkeitabschätzung liefert nur noch für die Front oder deutlich erkennbare interne Wellenfronten befriedigende Ergebnisse.

Abschnittsweise durchgeführte Laufzeitmessungen liefern mittlere Geschwindigkeiten für Teilstrecken von einigen hundert Metern bis hin zu wenigen Dezimetern Länge. Die vorausgegangenen Meßbeispiele zeigen, daß dabei auf kürzeren Meßstrecken mit stärkeren Schwankungen der Geschwindigkeitswerte zu rechnen ist. Für die Interpretation und weitere Verwendung der abschnittsweise erfaßten Daten erscheint es deshalb wichtig, neben dem Geschwindigkeitsmittelwert auch die Geschwindigkeitsschwankungen zwischen den Teilstrecken und innerhalb der Meßintervalle mit zu berücksichtigen.

Auch für die im folgenden beschriebenen Geschwindigkeiten an einzelnen Bahnpunkten sollten stets die Streubereiche mit angegeben werden.

3.3 Messungen an einzelnen Bahnpunkten

3.3.1 Strömungsgeschwindigkeitsmessungen

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Trockenschneelawinen verwendeten EYBERT-BERARD u.a.(1978) Flügelräder, die sie ebenfalls auf Stahlgerüsten im Lawenstrich installierten. Diese, aus der Hydrometrie übernommenen, zur Lawinenmessung etwas abgewandelten Geräte funktionieren nach dem Prinzip des Windrades: Das Flügelrad dreht sich umso schneller, je größer die Geschwindigkeit des darüber hinwegströmenden Mediums ist.

Aus der gemessenen Umdrehungszahl kann man die Geschwindigkeit vorbeifließenden Lawinenschnees für einen bestimmten Punkt im Lawenstrich ableiten. Allerdings liefern die Messungen nur für stark fluidisierte Lawinen gute Ergebnisse. Sobald der Lawinenschnee mit größeren Schneeklumpen durchsetzt ist kommt es zu Störungen, da die Schneebrocken das Flügelrad blockieren.

3.3.2 Geschwindigkeitsabschätzung aus Druckmessungen

Eine einzelne kleine Metallplatte, die senkrecht zur Fließrichtung der Lawine in den Lawenstrich eingebaut ist und die den Druck weiterleitet, welcher vom fließenden Lawinenschnee auf sie ausgeübt wird, kann schon zum Abschätzen der Strömungsgeschwindigkeit ausreichen. Allerdings setzt dieses Vorgehen eine realistische Einschätzung der Dichte ρ des fließenden Schnees voraus, denn der aufgenommene Druck ist dem Staudruck $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ proportional. Für die Strömung von Flüssigkeiten und Gasen gilt, daß der Strömungswiderstand F_w , den ein Körper mit seiner Stirnfläche ausübt, dem folgenden Widerstandsgesetz gehorcht

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c \cdot A \quad (5)$$

In dieser Formel bedeutet c einen Proportionalitätsfaktor, der durch die Form des druckaufnehmenden Körpers bestimmt wird. A ist der Querschnitt dieses Körpers.

Aus Gleichung (5) erhalten wir die Strömungsgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot F_w}{\rho \cdot c \cdot A}} \quad (6)$$

Mißt man F_w , so braucht man noch realistische Schätzwerte für c und ρ . Bleibt feuchter Schnee an der Drucksonde haften, dann ändert sich die Form der Drucksonde und damit auch der Proportionalitätsfaktor c . Enthält die Lawine harte Schneeklumpen, deren Durchmesser die Druckplatte übertrifft, so bekommen wir auch bei richtig geschätzter mittlerer Dichte der Lawine viel zu hohe Geschwindigkeiten. Das Abschätzen der absoluten Geschwindigkeiten aus Druckmessungen führt deshalb bei Lawinen mit größeren, klumpigen Teilchen zu unsicheren Ergebnissen. Das Meßverfahren ist nur für feindisperse Trockenschneelawinen geeignet.

Je nach den verfolgten Zielen und abhängig von den zur Verfügung stehenden technischen Einrichtungen werden überwiegend zwei Druckmeßverfahren angewandt: Die Penetrometer-Methode und die kontinuierliche Messung über Drucksensoren.

Bei der Penetrometer-Methode prallt die Lawine - genauer einzelne Massenteile der Lawine - auf eine Meßplatte bestimmter Größe. Die Meßplatte ist auf der Rückseite mit einem Stahldorn versehen, der sich beim Aufprall der Lawinenteile in eine Hartaluminiumplatte bohrt. Beispiele für die Gerätekonstruktion findet man unter anderem bei SHODA (1966) und SHIMIZU u.a.(1972). Aus der Tiefe und dem Durchmesser des Eindrückkraters kann man den aufgetretenen Druck errechnen (SPINDLER 1957).

Dieses Verfahren liefert den Maximalwert der Druckbelastung während eines Lawinnenniederganges für den Lagepunkt der Meßplatte. Die Anordnung mehrerer solcher Druckdosen kann Aufschlüsse über die flächige Verteilung der Maximaldrücke im Stromquerschnitt einer Lawine geben (vgl. KOTLYAKOV 1977). Diese Druckverteilungsbilder lassen Rückschlüsse auf die Geschwindigkeitsverteilung in einer Lawine zu.

Eine zweite, vielfach angewandte Art, Druckbelastungen zu messen, besteht in einer kontinuierlichen Aufzeichnung des an einer Meßplatte anliegenden Lawinendrucks. Technische Details der Drucksensoren beschreibt SCHAERER (1973). Aus den Messungen erhält man Aufzeichnungsdiagramme, die in Abschnitt 3.2.5 bereits kurz angesprochen wurden.

Um die Druck-Zeit-Diagramme interpretieren zu können, muß man sich die Unterschiede zwischen lockeren und dichten Lawinenfließanteilen klarmachen. SCHAERER u.SALWAY (1980) beobachteten in Trockenschneelawinen einen dreischichtigen Aufbau: einen dichten, bodennahen Fließanteil, darüber einen lockeren Fließanteil und darüber die hier nicht interessierende Schneestaubwolke.

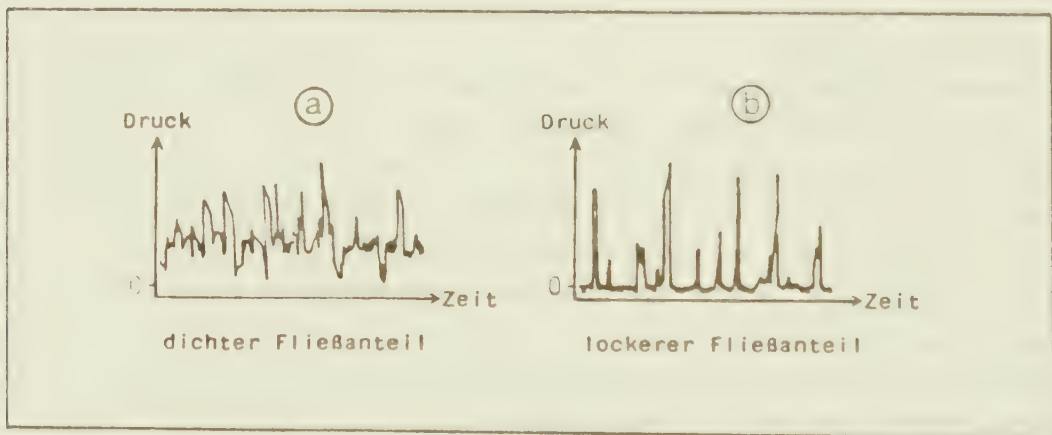


Abb.17 Vergleich der Druck-Zeit-Diagramme für den dichten und lockeren Fließanteil von Trockenschneelawinen (nach SCHAERER u. SALWAY, 1980)

Im Aufzeichnungsdiagramm erzeugt der dichte Strom einen Basisdruck, der in mehr oder weniger regelmäßigen Zeitabständen deutlich über-
troffen wird (Abb.17a). Das Ansteigen der Druckbelastungen schreiben
SCHAERER und SALWAY dem Eintreffen interner Wellenfronten zu (vgl.
Abschn.2.3). Das Verhältnis Spitzendruck zu Basisdruck liegt nach
übereinstimmenden Untersuchungsergebnissen (SHIMIZU u.a 1974, EYBERT-
BERARD u.a. 1978, KOTLYAKOV u.a. 1980, SCHAERER u.SALWAY 1980) inner-
halb einer Lawine etwa zwischen 2.4:1 und 3.3:1.

Im lockeren Fließanteil einer Trockenschneelawine zeigen die Meß-
aufzeichnungen keinen Basisdruck. Zwischen den einzelnen, unregelmäßig
auftretenden Meßsignalen sinkt die Anzeige auf Null (Abb.17b). Diesen
Diagrammverlauf kann man sich dadurch erklären, daß der lockere Fließ-
anteil einer Lawine aus einem Luft-Schnee-Gemisch besteht, bei dem die
Luft bereits einen großen Volumenanteil einnimmt. Dann besteht zwischen
vielen einzelnen Schneeaggregaten keine direkte Verbindung mehr. Am
Meßgerät wechseln sich deshalb ankommende Schneepartikel und Luftmas-
senteile ab. Die größeren Schneeaggregate erzeugen die Druckausschläge.
Der Staudruck der Luft liegt unter der Anzeigeschwelle und führt des-
halb zu keinem Ausschlag im Diagramm.

Im folgenden verzichten wir auf eine Abschätzung der absoluten Ge-
schwindigkeiten aus Druckmessungsdaten. Allerdings wollen wir die oben
genannte Beziehung zwischen Basisdruck und Spitzendruck im dichten
Fließanteil zum Abschätzen der Relation zwischen der Durchschnittsge-
schwindigkeit in einer Trockenschneelawine und der Spitzengeschwindig-
keit einzelner Massenteile verwenden.

Der Spitzendruck beträgt rund das 2.4- bis 3.3-fache des Basisdrucks.
Wenn wir annehmen, daß diese Unterschiede nicht auf unterschiedlichen
Dichten von Massenteilen beruhen, so erhalten wir

$$\frac{P_{\max}}{\bar{P}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v_{\max}^2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot \bar{v}^2} = \frac{v_{\max}^2}{\bar{v}^2} = 2.4 \quad (3.3) \quad (7)$$

und

$$\frac{v_{\max}}{\bar{v}} = \sqrt{2.4} = 1.5 \quad (1.8) \quad (8)$$

Daraus schließen wir, daß im dichten Fließanteil die Spitzengeschwin-
digkeiten einzelner Massenteile rund 50 bis 80 Prozent über der mitt-
leren Teilchengeschwindigkeit liegen.

In Abschnitt 4.5 wollen wir diese Daten mit Zahlen vergleichen, die
aus Laufzeitmessungen abgeleitet werden.

Die Laufzeitmessungen auf kurzen Strecken, die Strömungsmessungen und die aus Druckmessungen abgeleiteten Geschwindigkeitswerte führen zu den Geschwindigkeiten, mit denen einzelne Massenteile nacheinander am Ort des Meßgerätes eintreffen. Wesentlich interessanter ist es jedoch zu klären, welche Geschwindigkeiten verschiedene Schneepartikel einer Lawine gleichzeitig, zu einem bestimmten Zeitpunkt aufweisen, denn dies führt nach der Definition in Tab.1 (Seite 6) direkt zur Lawinengeschwindigkeit. Mit der Radarmessung versucht man, das räumliche Nebeneinander der Individualgeschwindigkeiten zu erfassen. Dieser Meßmethode wollen wir uns im Abschnitt 3.4.1 zuwenden.

3.4 Kontinuierlich fortschreitende Geschwindigkeitsmessungen

3.4.1 Radarmessungen

Wird die Bewegung der Lawinenfront oder von Massenteilen in der Lawine mit einer Frequenz von mehreren Messungen pro Sekunde auf längeren Bahnstrecken erfaßt, so wollen wir diese Messungen als "kontinuierlich" bezeichnen.

Radarmessungen liefern Geschwindigkeiten zu bestimmten Zeitpunkten. Die Meßtechnik erlaubt es allerdings, viele dieser punktuellen Messungen in schneller Folge durchzuführen. Damit können Geschwindigkeitsverläufe detailliert ermittelt werden.

Von der Messung mit Radar darf man vielleicht die umfangreichste Information über das Geschwindigkeitsverhalten der Lawinen erwarten. Die Meßtechnik wird zur Zeit in der Schweiz entwickelt (GUBLER 1980, 1981). Sie beruht auf der Ausnützung des sogenannten DOPPLER-Effektes. Der Physiker DOPPLER erkannte, daß die von einer Schwingungsquelle (Sender) erzeugte Frequenz einer Welle vom Beobachter (Empfänger) verändert wahrgenommen wird, wenn sich Sender und Empfänger relativ zueinander bewegen. Die Frequenzänderung hängt von der Relativgeschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger ab (FRANKE 1959). Der DOPPLER-Effekt tritt auch auf, wenn Schwingungen konstanter Wellenlänge, an einem sich bewegenden Objekt reflektiert werden. Aus dem Vergleich der Frequenz des Sendersignals mit der Frequenz des zurückgestrahlten, dopplerverschobenen Signals kann man auf die Geschwindigkeit des Objektes in Richtung auf den Radar schließen. Das Material des Reflexionskörpers, seine Form und seine Oberflächenrauigkeit beeinflussen die Intensität der Rückstrahlung. Durch die Wahl bestimmter Wellenlängenbereiche kann man versuchen, die Reflexionseigenschaften des sich bewegenden Objekts optimal zu nutzen. Für Geschwindigkeitsmessungen in Lawinen sind nach GUBLER (1980) Mikrowellen im Frequenzbereich zwischen 5 und 15 GHz am besten geeignet.

Die Schweizer Forscher verwenden eine kontinuierliche Wellen ausstrahlende Mikrowellenmeßtechnik (CW-Radar). Sie erhalten damit Auskunft über die momentanen Geschwindigkeiten der Schneepartikel einer Lawine zu beliebigen Beobachtungszeitpunkten. Auswertungstechnisch begründet umfaßt ein Meßzeitpunkt eine Zeitspanne von 12.5 Millisekunden. Erste Testmessungen arbeiteten mit einer Auflösung von rund 3 Aufnahmen pro Sekunde (GUBLER 1980).

Aus den Meßaufnahmen erhält man ein Spektrum zurückgestrahlter Frequenzen. Dieses Frequenzspektrum läßt Aussagen über die Variation der auftretenden Individualgeschwindigkeiten solcher Massenteilen in der Lawine zu, deren Abstand vom Wellensender sich während der Messung verändert. Es interessieren jedoch nicht die Geschwindigkeitsvektoren in Richtung zum Radar, sondern die hangabwärts gerichteten Bewegungskomponenten. Deshalb müssen die gemessenen Geschwindigkeitsspektren umgerechnet werden. Dazu ist es notwendig, den Geländeort der jeweiligen Momentaufnahme zu kennen, denn das Verhältnis der in Wellenstrahlrichtung liegenden Geschwindigkeitskomponenten des Lawinenschnees zu den hangparallelen Komponenten ändert sich von Ort zu Ort. Die Bestimmung der ortsspezifischen Geländeparameter und die, in einem turbulent fließenden Medium auftretenden, ungerichteten Teilchenbewegungen lassen diese Umrechnung problematisch erscheinen und bergen, zumindest für einzelne Lawinenklumpen oder Lawinenteilbereiche eine analytische Unsicherheit. Über erste Versuche hinausgehende Testmessungen mit anschließender Interpretation der Ergebnisse werden zeigen, inwieweit die gefundenen Geschwindigkeitswerte für Modellrechnungen verwendet werden können.

Als Hilfsmittel zum Umrechnen der Geschwindigkeitsspektren dienen Erkenntnisse über die räumliche Verteilung der Individualgeschwindigkeiten in der Lawine. Diese Information gewinnen die Schweizer Wissenschaftler über Radaranlagen mit variierender Sendefrequenz (FMCW-Radar), die sie an einzelnen Punkten des Lawinenstrichs fest im Untergrund installieren. Geschwindigkeitsverteilungen im Inneren der Lawine kann man messen, wenn man zwei FMCW-Radargeräte kurz hintereinander (ca.10m) in der Falllinie in den Lawinenstrich einbringt und die dort aufgezeichneten Daten miteinander vergleicht^{*)}. Die so erfaßten örtlichen Geschwindigkeitsunterschiede dienen anschließend zum Interpretieren der CW-Radar-Geschwindigkeitsspektren. Die eingegrabenen FMCW-Radar liefern darüber hinaus in kleiner zeitlicher Auflösung Informationen über die Dicke der ruhenden Schneedecke, über die Fließhöhe der darüber hinwegströmenden Lawine und über die Korngrößen im Lawinenschnee.

^{*)} Mündliche Mitteilung von Herrn Dr. Gubler, Eidg. Institut f. Schnee- und Lawinenforschung, Weißfluhjoch/Davos

Der finanzielle und entwicklungstechnische Aufwand für das Meßsystem ist sehr hoch, doch scheint der Einsatz gerechtfertigt, denn neben den vielfältigen und differenzierten Meßmöglichkeiten hat das System den Vorteil an beliebigen, unpräparierten Lawinenhängen einsetzbar zu sein - ein wichtiger Gesichtspunkt, wenn man an das Sammeln vielschichtiger, statistisch auswertbarer Lawinendaten denkt. Darüber hinaus erlaubt die Meßtechnik auch Arbeiten bei schlechten Sichtverhältnissen.

3.4.2 Kontrollierte Filmaufzeichnung der Frontbewegung

3.4.2.1 Grundsätzliche Überlegungen zum selbst entwickelten Meßverfahren

In den vorausgegangenen Abschnitten betrachteten wir verschiedene Varianten der Lawinengeschwindigkeitsbestimmung. Welche Meßmethode bei geplanten Geschwindigkeitserhebungen anzuwenden ist, hängt von den örtlichen Gegebenheiten, von den personellen und finanziellen Möglichkeiten und von den zugrundeliegenden Zielvorstellungen ab.

Auf den folgenden Seiten soll eine Meßmethode ausführlich erläutert werden, die bei der Suche nach geeigneten Lawinendaten entstanden ist. Es kam darauf an, Werte für eine statistische Analyse des Lawinengeschehens zu gewinnen; das sind Daten, mit denen man das bereits erwähnte Beziehungsgefüge Schneeart - Anrißvolumen - Geländeform - Lawinengeschwindigkeit - Reichweite durchleuchten kann. Um dieses Ziel zu erreichen, soll das Meßverfahren folgende Forderungen erfüllen:

1) Die Meßmethode soll die Frontgeschwindigkeit erfassen.

Da die Lawinengeschwindigkeit nicht direkt meßbar ist, müssen die Messungen zu Werten führen, von denen auf die Lawinengeschwindigkeit geschlossen werden kann. Die Frontgeschwindigkeit weist zwar häufig ein Pulsieren auf, das es verbietet, sie direkt der Lawinengeschwindigkeit gleichzusetzen. Das rhythmische Auftreten der Schwankungen ermöglicht es jedoch, den Bewegungsablauf als Folge einzelner Schwingungen zu betrachten. Da eine Schwingung hohe und niedrige Frontgeschwindigkeitswerte umfaßt, kann für ein Schwingungsintervall die mittlere Frontgeschwindigkeit der mittleren Lawinengeschwindigkeit gleichgesetzt werden.

2) Das Meßverfahren soll den Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront in der Hauptfließrichtung auf der gesamten Lawinenbahn oder auf größeren Teilstrecken möglichst genau und kontinuierlich wiedergeben.

Damit steht der Weg offen, über geeignete mathematisch-statistische Verfahren die Variation der Frontgeschwindigkeit zu untersuchen. Ziel wird es sein, zu erfahren, welcher Teil der Gesamtvariation durch interne Wellenbewegungen verursacht wird und welche Variationen sich mit äußeren Einflüssen (liegende Schneedecke und Gelände) erklären lassen. Im Rahmen der Arbeit wird auf diese Fragestellung nicht näher eingegangen, da noch kein aussagekräftiges Datenmaterial vorliegt.

3) Das Verfahren soll Messungen an verschieden geformten, nicht präparierten Lawinenstrichen erlauben.

So kann man flexibel auch vorher nicht eingeplante Striche berücksichtigen.

sichtigen um eine breite Vielfalt von Geländeformen in die Statistik einzubringen.

- 4) Die Meß- und Bedienungstechnik soll möglichst einfach sein.

Dann können gegebenenfalls Messungen auf breiter Basis, von verschiedenen Personen an unterschiedlichen Orten durchgeführt werden.

- 5) Das Meßgerät soll tragbar sein.

Die für das Meßverfahren notwendigen Geräte sollen von maximal zwei Personen zum Einsatzort transportiert werden können. Damit sind auch an abseits gelegenen, mit Fahrzeugen nicht erreichbaren Lawinestrichen Geschwindigkeitsmessungen möglich.

- 6) Die Meßapparatur muß von externer Energieversorgung (Generatoren, Netzstrom) unabhängig sein.

Die letzten Forderungen resultieren aus der geographischen, infrastrukturellen und skitouristischen Situation im Bayerischen Alpenraum. Sie bietet nur sehr beschränkt Möglichkeiten zur Lawinenbeobachtung. Um dennoch Lawinendaten zu erhalten, scheint eine gewisse Flexibilität notwendig, die durch die Meßtechnik nicht wesentlich eingeschränkt werden sollte.

Außer den Forderungen 1) bis 6) durften die Kosten die verfügbaren Geldmittel nicht übersteigen.

Unter diesen Voraussetzungen entstand ein optisches Meßverfahren, das man als "kontrollierte Filmaufzeichnung der Frontbewegung von Lawinen" bezeichnen kann.

3.4.2.2 Das Meßprinzip

Das Meßprinzip beruht auf der vereinfachten, für den zweidimensionalen Raum geltenden Überlegung, daß zwei Geraden einen eindeutigen Schnittpunkt haben, sofern sie nicht parallel verlaufen. Diese Tatsache kann man zur Ortsbestimmung verwenden.

Betrachten wir die Abbildung 18 und stellen wir uns vor, eine Lawine reiße am Punkt A_0 ab und dringe bis zur Stelle E vor. Wir stünden in der Verlängerung des Lawinestricts am Punkt B und beobachteten den Niedergang der Lawine.

Zu einem bestimmten Zeitpunkt t_d nach dem Abriß erreicht die Lawine den Punkt D. Beim Passieren dieses Punktes beobachten wir die Lawinenfront vom Standpunkt B aus unter einem, auf das Horizontalniveau bezogenen Winkel δ . Den kurze Zeit später von der Lawine erreichten Punkt G betrachtet man unter dem Blickwinkel γ . Wir nehmen an, die Winkel δ und γ werden beim Meßvorgang zahlenmäßig erfaßt.

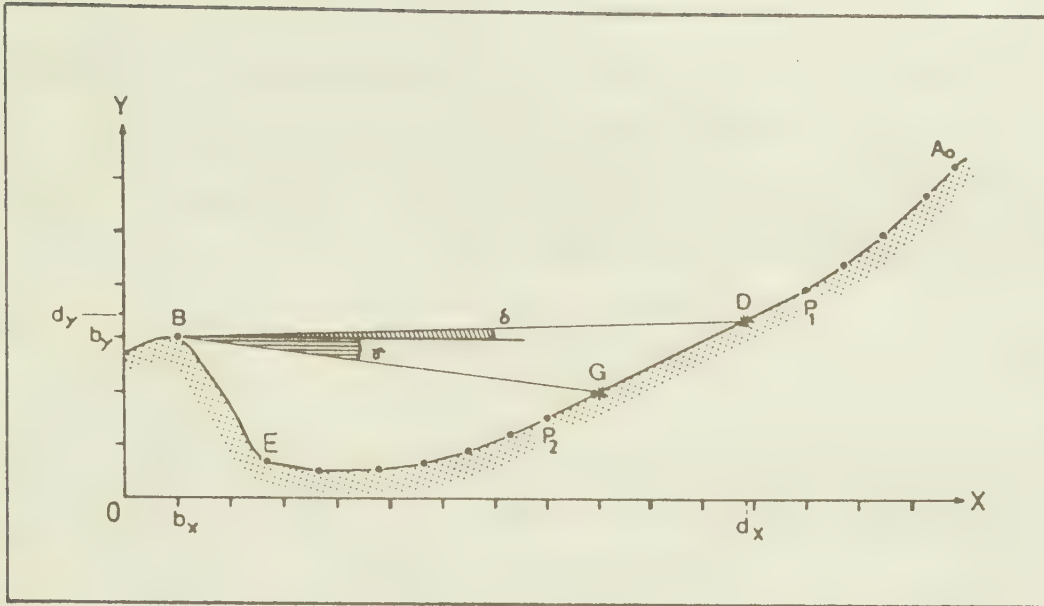


Abb.18 Das Meßprinzip: Punkte im Lawinenhang (G u. D) lassen sich eindeutig bestimmen, wenn der Beobachtungsstandpunkt (B) und die auf die Horizontale bezogenen Blickrichtungswinkel (δ u. γ) bekannt sind.

Stellt man das vermessene Geländeprofil mit dem Lawenstreich und dem Beobachtungspunkt B in ein Koordinatensystem, so können dem Punkt B die Ortskoordinaten b_x und b_y zugeordnet werden. Auch der Lawenstreich ist als Folge aneinandergereihter Geradenabschnitte geometrisch eindeutig darstellbar. Unter diesen Voraussetzungen ist es möglich, die Geländepunkte D und G, welche die Lawenfront zu den Zeitpunkten t_d und t_g durchlaufen hat, später wiederzufinden.

Ein Zahlenbeispiel soll das rechnerische Vorgehen verständlicher machen. Wir berechnen die Lage des Punktes D. Die dazu erforderlichen Grundgleichungen und Rechenoperationen sind mathematischen Formelsammlungen zu entnehmen. Für das Zahlenbeispiel hat B die Koordinaten $b_x=1$ und $b_y=3$ oder kurz (1,3). Der gemessene Richtungswinkel δ betrage 2.6° und außerdem sei bekannt, daß der gesuchte Punkt D zwischen den Punkten $P_1(13,4)$ und $P_2(8,1.5)$ auf dem Lawenstreichlängsprofil liege.

Den Blick von Punkt B unter dem gemessenen Winkel δ auf den Lawenhang kann man geometrisch als Gerade darstellen. Diese Gerade hat die allgemeine Gleichung

$$y = \tan \delta \cdot (x - b_x) + b_y \quad (9)$$

Setzt man in sie die oben angeführten Zahlen ein, so erhalten wir

$$y = \tan 2.6^\circ \cdot (x-1) + 3 \quad (10)$$

Jedes Koordinatenpaar (x,y) , das diese Gleichung erfüllt, bestimmt einen Punkt auf der Beobachtungsgeraden. Nur einer dieser Punkte liegt aber gleichzeitig auf dem Lawenstrichlängsprofil, also auf dem Geradenabschnitt zwischen P_1 und P_2 . Die durch die Punkte P_1 und P_2 verlaufende Gerade hat die Gleichung

$$\frac{y - P_{1y}}{x - P_{1x}} = \frac{P_{2y} - P_{1y}}{P_{2x} - P_{1x}} \quad (11)$$

Nach dem Einsetzen der Koordinaten $(13,4)$ für P_1 und $(8,1.5)$ für P_2 lautet die nach y aufgelöste Gleichung

$$y = 0.5 \cdot x - 2.5 \quad (12)$$

Der gesuchte Punkt D (d_x, d_y) muß sowohl Gleichung (10) als auch Gleichung (12) erfüllen. Seine X-Koordinate erhalten wir, wenn wir Gleichung (10) in Gleichung (12) einsetzen:

$$\tan 2.6^\circ \cdot (x-1) + 3 = 0.5 \cdot x - 2.5 \quad (13)$$

Aus dieser Gleichung kann man x errechnen.

$$x = d_x = 11.8$$

Bringen wir den ermittelten x -Wert in die Gleichung (12) ein, so erhalten wir die zugehörige y -Koordinate.

$$y = d_y = 3.4$$

Der anvisierte Punkt D hat also die Koordinaten $(11.8, 3.4)$ und ist damit eindeutig im Längsprofil lokalisierbar. Genauso kann man im Beispiel der Abb.18 für den Punkt G ($\varphi = -7.10^\circ$) und für jeden beliebigen anderen Punkt, für den der Blickwinkel gemessen wurde, verfahren.

Im allgemeinen ist nicht bekannt, in welchem, als kurzes Geradenstück darstellbaren Lawenstrichbereich der Schnittpunkt zu suchen ist. Dann sind die Berechnungen fortschreitend für jede mögliche Teilstrecke durchzuführen, solange bis der tatsächliche Schnittpunkt zwischen Blickgerade und Lawenstrichlängsprofil gefunden ist.

Das zweidimensionale Beispiel diene nur zur anschaulichen Erläuterung des gedanklichen Hintergrunds. Für die tatsächlichen Auswertungen sind Berechnungen im dreidimensionalen Raum notwendig, denn Beobachtungsstandpunkt und Lawenstrichpunkte liegen im allgemeinen auf verschiedenen Ebenen. Der Lawenstrich kann weiterhin als Aneinanderreihung

GERADE

bestimmt durch:

- Punkt A (a_1, a_2, a_3)
- Richtung $\vec{r}$

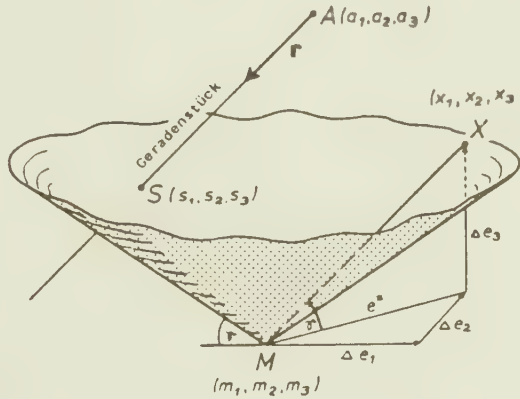
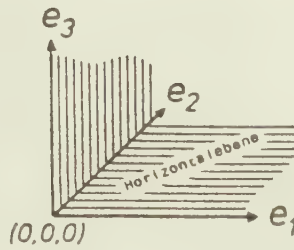
allgemeine vektorielle Punkt-Richtungs-Form der Geraden:

$$\vec{y} = \vec{a} + \lambda \cdot \vec{r}$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix}$$

in Komponentendarstellung lautet die allgemeine Geradengleichung:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1 + \lambda \cdot r_1 \\ y_2 &= a_2 + \lambda \cdot r_2 \\ y_3 &= a_3 + \lambda \cdot r_3 \end{aligned}$$



KREISKEGEL

bestimmt durch:

- Mittelpunkt M (m_1, m_2, m_3)
- Mantelflächenneigung γ

für jeden beliebigen Punkt X (x_1, x_2, x_3) auf dem Kegel gilt:

$$I) e^* = \frac{\Delta e_3}{\tan \gamma}$$

$$II) e^* = \sqrt{\Delta e_1^2 + \Delta e_2^2}$$

durch Gleichsetzen von I) und II):

$$\Delta e_1^2 + \Delta e_2^2 = \frac{\Delta e_3^2}{\tan^2 \gamma}$$

mit: $\Delta e_1 = x_1 - m_1$; $\Delta e_2 = x_2 - m_2$; $\Delta e_3 = x_3 - m_3$ erhält man die Kreiskegelgleichung

$$(x_1 - m_1)^2 + (x_2 - m_2)^2 - \frac{(x_3 - m_3)^2}{\tan^2 \gamma} = 0$$

Wo schneiden sich Gerade und Kegel ?

Der gesuchte Schnittpunkt S (s_1, s_2, s_3) liegt auf der Geraden:

$$(g) \quad \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} + \sigma \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix}$$

Der gesuchte Schnittpunkt S (s_1, s_2, s_3) liegt auf dem Kreiskegel:

$$(s_1 - m_1)^2 + (s_2 - m_2)^2 - \frac{(s_3 - m_3)^2}{\tan^2 \gamma} = 0 \quad (k)$$

Setzt man die S-Komponenten der Geradengleichung (g) in die Kegelgleichung (k) ein, so erhält man eine Gleichung mit nur einer Unbekannten (σ):

$$(a_1 + \sigma \cdot r_1 - m_1)^2 + (a_2 + \sigma \cdot r_2 - m_2)^2 - \frac{(a_3 + \sigma \cdot r_3 - m_3)^2}{\tan^2 \gamma} = 0$$

σ wird aus dieser quadratischen Gleichung berechnet. Es ergeben sich zwei Lösungswerte σ_1 und σ_2 .

Die gesuchten Schnittpunkte S_1 und S_2 erhält man, wenn man die errechneten σ -Werte in den rechten Teil der Geradengleichung einbringt und die Koordinaten s_1 , s_2 und s_3 zeilenweise ermittelt.

Abb.19 Schema der Schnittpunktberechnung zwischen Kreiskegel und Gerade im dreidimensionalen Raum

einzelner, allerdings im Raum dreidimensional angeordneter Geradenstücke angesehen werden. Die rechenoperativ günstige vektorielle Punkt-Richtungsform dieser Geradenstücke ist in Abb.19 links angegeben.

Alle denkbaren Geraden, die zur Horizontalen den Winkel γ aufweisen, liegen auf einem Kegel. Aus der Blickgeraden mit dem Winkel γ wird deshalb im Raum ein Kreiskegel mit der Kegelspitze M im Beobachtungsstandpunkt B. Der gemessene Beobachtungswinkel bestimmt die Neigung der Kegelmantelfläche gegenüber der Horizontalebene. In der Abb.19 ist die Kegelgleichung rechts neben der Kegelfigur angegeben. Außerdem ist kurz in allgemeinen Formeln skizziert, wie man Kegel und Gerade zum Schnitt bringt. Dazu setzt man in die allgemeine Geradengleichung den Geradenpunkt A (a_1, a_2, a_3) und den Richtungsvektor r (r_1, r_2, r_3) ein. Die Gleichung hat 4 Unbekannte: s_1, s_2, s_3 und δ .

Da der Punkt S (s_1, s_2, s_3) sowohl auf der Geraden, als auch auf dem Kegel liegt, muß er auch die Kegelgleichung erfüllen. Wir können also die einzelnen Richtungskomponenten s_1, s_2 und s_3 der Geradengleichung in die Kegelgleichung einbringen.

Die s_1 -, s_2 - und s_3 -Werte der Kegelgleichung werden durch den jeweiligen, rechten Teil der Geradengleichung ersetzt. Man erhält eine Gleichung mit nur einer Unbekannten δ . Sie kann nach δ aufgelöst werden.

Da die analytisch-geometrische Darstellung des Kreiskegels eine in Bezug auf die Horizontalebene spiegelbildliche Figur ist, erhält man beim Errechnen des Schnittpunktes zwischen Gerade und Kegel eine quadratische Lösungsgleichung und damit zwei Schnittpunktmöglichkeiten. Es bereitet jedoch im allgemeinen keine Schwierigkeiten den richtigen, auf dem Lawenstrich liegenden Punkt zu finden. Nur für Neigungswinkel sehr nahe an Null können Bestimmungsprobleme auftreten, da dann beide errechneten Schnittpunkte eng beieinander liegen. In Abschnitt 3.4.2.7 ist die Schnittpunktberechnung zwischen Geradenstück und Kegel an einem konkreten Beispiel durchgerechnet.

Die Darstellung der geometrischen Zusammenhänge zeigt, daß es für eine kontrollierte Lawinenfrontbeobachtung ausreicht, das Längsprofil des Lawenstrichs und den Standpunkt des Beobachters genau zu bestimmen. Das ist mit guten Höhenlinienkarten und vermessungstechnischen Methoden ohne weiteres durchführbar. Darüber hinaus muß man versuchen, zu möglichst vielen Zeitpunkten während des Lawinniederganges den Neigungswinkel vom Beobachtungspunkt zur Lawinenfront zu messen. Eine Filmtechnik, bei der zu jedem Bild des Films der Neigungswinkel der Kamera gemessen wird, liefert diese Daten. Beim Lawinniedergang versucht man, die Filmkamera mit der Front mitzuführen.

3.4.2.3 Die Meßapparatur



Abb.20 Das Meßgerät zum Erfassen der fortlaufenden Frontbewegung einer Lawine.

Die Meßapparatur ist in Abb.20 dargestellt. Sie besteht aus einem Vermessungsstativ (1), einem Stativaufsatz (2) mit angeschlossenem Winkelcodierer (3), der aufgesetzten Schmalfilmkamera (4) und der in einem Gerät zusammengefaßten elektronischen Steuerungseinheit (5) und Datenspeicherungseinheit (6) sowie der ebenfalls integrierten Energieversorgung (7). Der

mit abgebildete Theodolith (8) wird nach erfolgreicher Lawinenmessung zu Kontrollzwecken eingesetzt.

Das Stativ ist ein handelsübliches, stabiles Vermessungsstativ. Auf dieses Vermessungsstativ wird der Stativaufsatz geschraubt und mit Hilfe dreier Justierschrauben horizontal eingeregelt. Ähnlich einem Vermessungstheodolithen hat der Stativaufsatz einen horizontalen Drehkreis und eine in der Vertikalen schwenkbare Achse, auf der die Filmkamera befestigt wird.

Die horizontale Trägerachse für die Kamera ist spielfrei mit der Drehachse des am Stativaufsatz angebrachten Winkelcodierers (GIO 90B-101) verbunden. Auf diese Weise mißt der Winkelcodierer die vertikalen

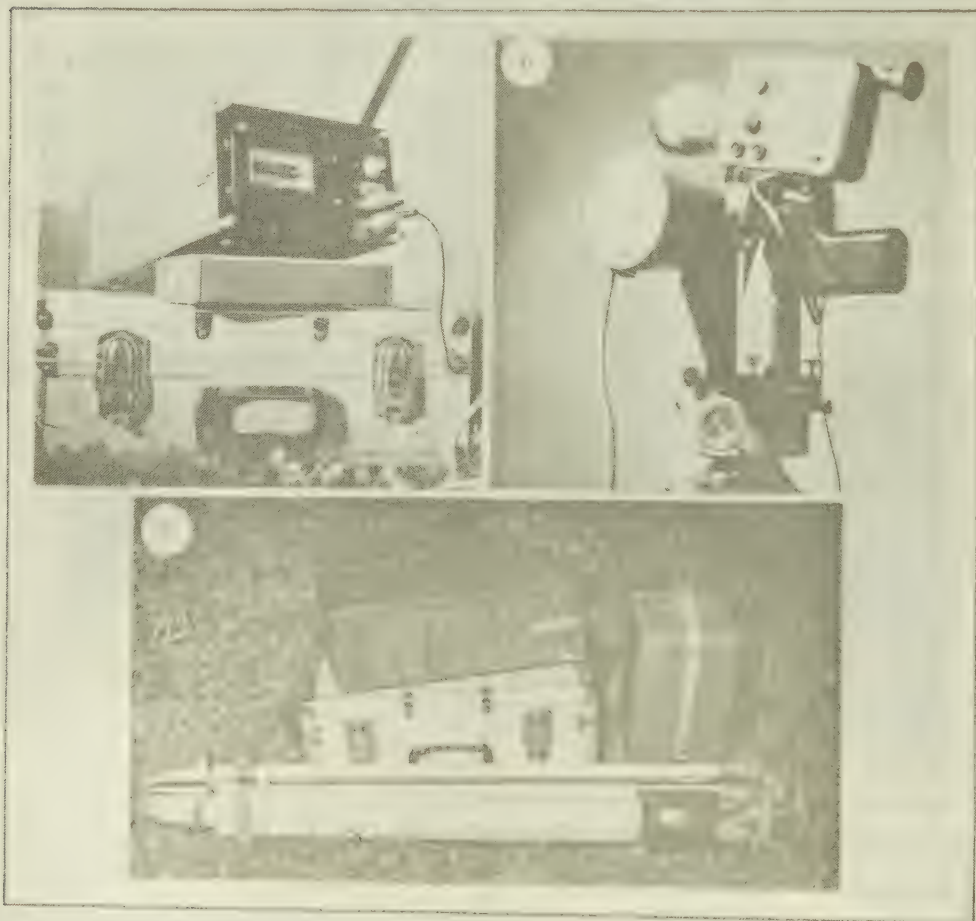


Abb.21 Ansichten des Meßgeräts

- a) Steuerungs- und Aufzeichnungseinheit
- b) Stativaufsatz mit Kamera und Winkelcodierer
- c) Meßausrüstung in verpacktem Zustand

Winkeländerungen beim Drehen der Achse relativ zur Lage des Stativaufsatzes. Der Winkelcodierer funktioniert auf optischer Basis und unterteilt den Vollkreis (360°) in 5000 Einheiten bei einer maximalen Winkelabweichung zwischen zwei beliebigen Punkten des Meßkreises von $2'$. Die durchschnittliche Meßgenauigkeit des einzelnen Winkelwertes liegt damit unter $\pm 1''$. Das vom Codierer ausgehende Signal kann man elektronisch weiter aufschlüsseln, so daß eine Auflösung von 20000 Einheiten pro Vollkreis bei der Lawinenmessung zur Verfügung steht. Die kleinsten meßbaren Winkeländerungen der Drehachse betragen damit 0.018° . Steht das Meßgerät 2000 Meter vom Lawinenort entfernt, so entspricht dies einer registrierbaren Höhenniveauänderung von 63 cm.

Die Filmkamera, deren Neigung der Winkelcodierer mißt, ist eine normale Super-8-Schmalfilmkamera (BRAUN NIZO MAKRO 801) mit 1.8-Zoom-Objektiv. Die Brennweite reicht von 7 bis 80 mm. Um die Filmkamera beim Nachführen an der Lawinenfront halten zu können, ist eine Visiereinrichtung oder ein guter Schnittbildentfernungsmesser mit deutlich erkennbarer Mittellinie im Sucher notwendig.

Der maximale Filmvorschub, mit dem die Lawinenbewegung beobachtet wird, beträgt 24 Bilder/sec. Eine exakte Filmgeschwindigkeitsregelung ist dabei nicht erforderlich, da in der Steuereinheit eine Zeitnahme mitläuft. So lassen sich etwaige Laufschränkungen registrieren und bei der Auswertung mit berücksichtigen. Die Aufnahmefolge von 24 Bilder/sec erlaubt bei Frontgeschwindigkeiten von 20 bis 50 m/s eine abschnittsweise Frontgeschwindigkeitsauswertung in Intervallen von 1 bis 2 Meter.

Als Filmmaterial dient 25-ASA-Normalfilm (AGFA-MOVIECHROM 40 bzw. KODAK-EKTACHROM). Da Standardfilmkassetten verwendet werden, ist die maximale Lawinenbeobachtungsdauer bei angegebener Filmgeschwindigkeit von 24 Bilder/sec auf 2.3 Minuten begrenzt. Für Trockenschneelawinen dürfte diese Zeitspanne in jedem Fall ausreichen. Bei langsamen Feucht- und Naßschneelawinen, deren künstliche Auslösung allerdings nur selten gelingen wird, kann die Aufzeichnungsgeschwindigkeit auf unter 18 Bilder/Sec zurückgenommen werden, um längere Beobachtungszeiten zu erhalten.

Kamera und Winkelcodierer sind mit der Steuerungseinheit (EKK-27^{*)}) verbunden. Die Steuerungselektronik ruft bei jeder Bildauslösung vom Winkelcodierer den Neigungswert der Kamera ab. Gleichzeitig kann ein zweiter Winkel, etwa der Horizontalwinkel, erfaßt werden. Bislang wurde

^{*)} Konstruktion: Ingenieurbüro Geb.Krahmer, Ottobrunn b.München

allerdings auf die Messung des Horizontalwinkels verzichtet, da dieser zusätzliche Wert keine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse brächte.

Parallel zur Neigungswinkelmessung liefert ein "timer" im Mikroprozessor der Steuerungseinheit die seit Meßbeginn vergangene Zeit. Die Zeitmessung erfolgt in Einheiten von 0.3 ms. Die zu einem Bild gehörigen Winkel- und Zeitwerte werden zu einem Datensatz verknüpft und auf Magnetband gespeichert. Der Magnetband-Kassetten-Teil (CDS 1.00 mit Kassettenformat ECMA34) ist zusammen mit der Steuerungselektronik in einem feuchteisolierten Gehäuse untergebracht.

Ein kleines Risiko ist der Verzicht auf eine zusätzliche Beheizung des Gehäuses. Da über die Kälteempfindlichkeit einzelner Bauteile unterschiedliche Angaben vorliegen, und weil die Wärmeabgabe beim Betrieb des Gerätes in dem hermetisch abgedichteten Gehäuse einen gewissen Kälteschutz darstellt, kann kein zuverlässiger Temperaturbereich für den Einsatz des Gerätes angegeben werden. Mehrstündige Tests bei Temperaturen um -10°C verliefen problemlos. Da während Lawinenmessungen im Bayerischen Alpenraum nur selten mit Temperaturen unter -10°C zu rechnen ist, dürfte die fehlende Isolierung gegen Kälte nicht zu größeren Schwierigkeiten führen. Zur Beheizung der Anlage wäre eine weitere Energieversorgung notwendig, die zusätzlich Platz und Gewicht beansprucht.

Die Stromversorgung zum Betreiben des Meßgeräts ist im Fuß der Steuerungseinheit integriert. Der Energieteil besteht aus einem Satz Nickel-Cadmium-Akkumulatoren mit einer Nennkapazität von 4 Ah. Damit ist eine 1-stündige Aufzeichnungsdauer gewährleistet. Das reicht im Schnitt für 5 bis 6 Lawinenbeobachtungen. Über ein Netzladegerät können die Energievorräte wieder aufgefüllt werden.

Die gesamte Meßapparatur (Abb.21c) wiegt einschließlich des für Kontrollmessungen wichtigen Theodolithen 32 kg und kann auf einem Tragegestell gegebenenfalls von einem Mann zum Einsatzort transportiert werden.

3.4.2.4 Die Durchführung der Messung

Der Aufbau der Meßapparatur am Beobachtungsstandpunkt, der dem Lawinenstrich möglichst gegenüber liegen sollte, erfordert etwa 10 bis 15 Minuten. Beim Aufstellen der Geräte ist besonders auf einen festen und sicheren Stand des Statives zu achten, denn Veränderungen an der Stativstellung während der Lawinenbeobachtung führen zu nicht korrigierbaren Meßfehlern.

Da nach dem Beginn der eigentlichen Lawinenmessung keine Zeit mehr für eine eventuelle Nachregelung des Meßgeräts bleibt, ist es vorteilhaft, nach dem Aufstellen der Geräte das System und die Grundeinstellungen der Kamera und der Steuerungseinheit an Hand einer Checkliste zu überprüfen.

Nach dieser Überprüfung erfolgt eine 1. Peilmessung. Dabei werden markante Geländepunkte anvisiert und in Einzelbildschaltung aufgenommen. Die zu den Peilpunkten (Gipfelkreuz, Hüttendach, Stromleitungsmasten etc.) gemessenen Winkel dienen beim Auswerten der Meßdaten zur Kontrolle, ob sich die Position des Stativs mit der Kamera während der Messung verändert hat.

Nach der 1. Peilmessung wählt man die Brennweiteneinstellung für die Lawinenbeobachtung. Die Brennweite der Kamera sollte so eingestellt sein, daß die Anrißzone nicht zu klein im Bild erscheint. Andererseits darf die Brennweite nicht zu groß gewählt werden, um auch im Auslaufbereich, der dem Beobachtungstandpunkt näher liegt, die Lawinenfront überblicken zu können. Die Brennweiteneinstellung darf während der gesamten Meßphase nicht gewechselt werden, um nachträglich rechnerisch Meßwertkorrekturen durchführen zu können (vgl. Abschnitt 3.4.2.53).

Nachdem diese Vorbereitungen getroffen sind, wird das vermutliche Anrißgebiet der Lawine anvisiert. Dann wartet man auf die künstliche Auslösung der Lawine. Dabei ist es günstig, wenn sich ein Mitarbeiter des Meßteams voll auf den Moment der Auslösung konzentriert und beim Sichtbarwerden der Detonationsrauchwolke die Kamera und damit das gesamte Meßsystem inklusive Zeitmessung mittels Fernauslöser in Gang setzt. Der zweite, für die Kameraführung verantwortliche Mitarbeiter versucht nach der Sprengung möglichst schnell die Lawinenfront in den Sucher und an den Horizontalbalken des Schnittbildentfernungsmessers zu bringen. Die Visiereinrichtung auf die Front haltend, führt man die Kamera der niederstürzenden Lawine bis zum Stillstand nach.

Nachdem die Lawine zur Ruhe gekommen ist, wird die Lawinenbahn noch einmal mit eingeschaltener Winkelmessung gefilmt. So erhält man sehr genaue Angaben über die Größe des Lawinenkegels, über die Orte auf der Bahn eventuell abgelagerten Lawinenschnees oder über die Lage des Stauchwalls einer Schneebrettlawine. Gegebenenfalls kann bei der Nachbetrachtung die Filmgeschwindigkeit gesenkt werden.

Der nächste Meßschritt ist eine Kontrollmessung, mit der die bisher konstant gehaltene Brennweiteneinstellung überprüft wird. Dazu filmt man kurz eine Meßlatte mit deutlich erkennbaren Abstandmarkierungen.

Diese Latte wird in 5 bis 10 m Entfernung vor der Kamera aufgestellt. Die genaue Distanz der Meßlatte zur Filmebene der Kamera mißt man mit einem Maßband. Diese Daten sind wichtige Grundlagen für die spätere Auswertung des Meßfilmes (vgl. Abschnitt 3.4.2.53)

Abschließend sind eine 2. und 3. Peilmessung durchzuführen. Dabei werden die bei der 1. Peilmessung anvisierten Geländepunkte zuerst noch einmal mit der Filmkamera (mit Winkelmessung) aufgenommen. Anschließend tauscht man den Stativaufsatz mit Kamera gegen den Theodolithen aus und mißt die Neigungs- und Richtungswinkel zu diesen Geländemarken mit dem Vermessungsgerät ein.

3.4.2.5 Das Übertragen und Aufbereiten der Daten

3.4.2.51 Übertragung der Daten auf die Großrechenanlage

Die Laufzeitmessungen einer Lawine, das anschließende Filmen des Lawinenstrichs und die Peilmessungen liefern zusammen im Schnitt zwischen 2000 und 3000 Meßwerte. Die weitere Verarbeitung dieser Daten führen wir am Rechenzentrum des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (IBM/3081) durch. Da die Meßwerte nicht direkt von den im Gelände benutzten ECMA-34-Kassetten in den Speicher der Rechenanlage überspielt werden können, muß die Datenübertragung einen etwas umständlichen Weg gehen: Von den Aufzeichnungskassetten werden die Meßdaten auf eine Zwischenkassette (SCOTCH DC 300A) kopiert und über diese Kassette am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften eingelesen. Der Rechner überträgt die Daten auf ein standardisiertes Magnetband. Dieses Magnetband dient dann an der IBM-Anlage als Eingabemedium.

3.4.2.52 Datenüberprüfung und -umwandlung

Die so eingelesenen Meßzahlen liegen in hexadezimaler Schreibweise vor. Die linke, 14-spaltige Zeichenkolonne in Tab.2 (S.65) enthält die Original-Eingabedaten. Jeder Eingabesatz besteht aus 3 vierstelligen Hexadezimalzahlen, die durch die Zeichen 'X' und 'Y' verbunden sind. Die hexadezimal verschlüsselten Zahlen sind in der Tab.2 mit T, W1 und W2

überschrieben. Dieser Aufbau der Datensätze erlaubt in der eingegebenen Form eine erste Überprüfung. Dabei werden folgende Kriterien untersucht:

1. Jeder Datensatz muß aus 14 alphanummerischen Zeichen bestehen.
2. Das fünfte Zeichen jeden Satzes muß ein 'X', das zehnte ein 'Y' sein.
3. Die Meßwertkombination des unbenützten Horizontalwinkels (dritter Viererblock:W2) muß unverändert bleiben.

Fehlerhafte Datensätze werden korrigiert oder, wenn eine einwandfreie Rekonstruktion nicht möglich ist, ausgesondert.

LAWINENSTRICH: CHR11 LAWINENREIGNIS: /9830120									
ORIGINAL(HEXA)	W1	W2	W2	W1	T	/BILD	W2 (GRAD)	W1 (GRAD)	ZEIT (SEC)
FFEDX7C8EY7FFF	32767-X	31886-Y	65517-T	/	1	0.0	0.0	0.0	21.817
006AX7C8EY7FFF	32767-X	31886-Y	65641-T	/	2	0.0	0.0	0.0	21.858
00E7X7C8EY7FFF	32767-X	31886-Y	65766-T	/	3	0.0	0.0	0.0	21.900
0164X7C8EY7FFF	32767-X	31886-Y	65891-T	/	4	0.0	0.0	0.0	21.942
01E0X7C8EY7FFF	32767-X	31886-Y	66015-T	/	5	0.0	0.0	0.0	21.983
025CX7C8EY7FFF	32767-X	31885-Y	66139-T	/	6	0.0	-0.018	0.0	22.024
025CX7C8EY7FFF	32767-X	31885-Y	66263-T	/	7	0.0	-0.018	0.0	22.024
03ALX7B9Y7FFF	32767-X	31640-Y	185897-T	/	965	0.0	-4.428	0.0	61.862
062BX7B9Y7FFF	32767-X	31640-Y	186022-T	/	966	0.0	-4.428	0.0	61.904
06ABX7B9Y7FFF	32767-X	31640-Y	186147-T	/	967	0.0	-4.428	0.0	61.945
0725X7B9Y7FFF	32767-X	31640-Y	186272-T	/	968	0.0	-4.428	0.0	61.987
07A2X7B9Y7FFF	32767-X	31639-Y	186397-T	/	969	0.0	-4.428	0.0	62.029
081FX7B9Y7FFF	32767-X	31638-Y	186522-T	/	970	0.0	-4.464	0.0	62.070
089CX7B9Y7FFF	32767-X	31637-Y	186647-T	/	971	0.0	-4.482	0.0	62.112
0919X7B9Y7FFF	32767-X	31635-Y	186771-T	/	972	0.0	-4.482	0.0	62.153
0995X7B9Y7FFF	32767-X	31635-Y	186896-T	/	973	0.0	-4.518	0.0	62.195
0A12X7B9Y7FFF	32767-X	31635-Y	187021-T	/	974	0.0	-4.518	0.0	62.236
0A8FX7B9Y7FFF	32767-X	31635-Y	187146-T	/	975	0.0	-4.518	0.0	62.278
0B0CX7B9Y7FFF	32767-X	31633-Y	187271-T	/	976	0.0	-4.554	0.0	62.320
0B89X7B9Y7FFF	32767-X	31632-Y	187396-T	/	977	0.0	-4.554	0.0	62.361
0C06X7B9Y7FFF	32767-X	31632-Y	187521-T	/	978	0.0	-4.572	0.0	62.403
0C83X7B9Y7FFF	32767-X	31631-Y	187646-T	/	979	0.0	-4.590	0.0	62.444
0D00X7B9Y7FFF	32767-X	31631-Y	187771-T	/	980	0.0	-4.590	0.0	62.486
0D7DX7B9Y7FFF	32767-X	31631-Y	187896-T	/	981	0.0	-4.590	0.0	62.528
0DFAX7B9Y7FFF	32767-X	31630-Y	188021-T	/	982	0.0	-4.608	0.0	62.569
0E77X7B8Y7FFF	32767-X	31629-Y	188146-T	/	983	0.0	-4.626	0.0	62.611
0EF4X7B8Y7FFF	32767-X	31628-Y	188271-T	/	984	0.0	-4.626	0.0	62.653
0F71X7B8Y7FFF	32767-X	31627-Y	188396-T	/	985	0.0	-4.644	0.0	62.694
0FEEX7B8Y7FFF	32767-X	31627-Y	188521-T	/	986	0.0	-4.662	0.0	62.736
E06BX7B8Y7FFF	32767-X	31625-Y	188646-T	/	987	0.0	-4.698	0.0	62.777
E0E8X7B8Y7FFF	32767-X	31624-Y	188771-T	/	988	0.0	-4.716	0.0	62.819
E165X7B8Y7FFF	32767-X	31623-Y	188896-T	/	989	0.0	-4.734	0.0	62.861
E165X7B8Y7FFF	32767-X	31623-Y	189021-T	/	990	0.0	-4.771	0.0	62.903

Tab.2 Ausschnitt aus dem Datenspeicher mit den im Gelände aufgezeichneten Meßwerten

Nach dieser ersten Datenkontrolle überträgt man die Hexadezimalkombinationen in dezimale Zahlen. In der Tab.2 finden wir die umgewandelten, absoluten Meßwerte in der 2. bis 4. Kolummne. Der nicht benötigte Horizontalwinkel ist durch ein angehängtes 'X', der gemessene Neigungswinkel der Kamerachse durch ein 'Y' und der Zeitwert durch ein angehängtes 'T' gekennzeichnet. Beim Einschalten des Meßgerätes im Gelände werden alle Winkelwertregister automatisch mit der Hexadezimalzahl 7FFF besetzt. Das entspricht der Dezimalzahl 32767. Diese Wertzuweisung be-

wirkt, daß die Winkelmessung vorwärts und rückwärts ablaufen kann, ohne daß die hexadezimalen Grenzwerte 0 und 7FFF unter- bzw. überschritten werden. In den Zahlenreihen W2 und W1 der Tab.2 erscheinen deshalb Zahlen in der Größenordnung um 30000. Die anfängliche Wertzuweisung ist beim Auswerten der Daten ohne Bedeutung, da nur mit Relativwinkeln weitergerechnet wird.

Die Zeitmessung beginnt beim Starten der Kamera mit Null und erhöht die Anzeige pro Millisekunde um 3 Einheiten. Die Spalte 'T' mit den dezimalen Zeitmeßwerten dient als weiteres Prüfkriterium für die Eingabedaten, denn jeder Zeitwert muß größer sein als die vorausgegangene Zeitmessung.

Anschließend an einen Schrägstrich folgen in den Datenzeilen in Tab.2 jene Werte, die den weiteren Bearbeitungsschritten als Grundlage dienen. Die erste Zahl nach dem Schrägstrich nummeriert die eingegangenen Datensätze laufend durch. Die Meßwertnummern schaffen die Verbindung zu den Bildern des Meßfilms. Die Kolumne in Tab.2 ist deshalb mit "BILD" überschrieben. Rechts anschließend folgt der Winkelwert des unbesetzten Meßeingangs. Er ist konstant Null. Die nächste Zahlenreihe gibt die Neigungswerte der Kamera wieder. Die Winkeldaten sind auf Grad umgerechnet und relativiert, das heißt, der Anfangswert wurde gleich Null gesetzt. Alle folgenden Winkelwerte beziehen sich auf diese Anfangszahl. Da die Lawinenmessung an der Anrißzone einsetzt und talwärts verläuft, sinken die relativierten Winkelmeßwerte ins Negative ab. Die letzte Spalte enthält die seit Meßbeginn vergangene Zeit.

Aus dem in Tab.2 wiedergegebenen Ausschnitt aus einer Datenliste kann man beispielsweise für den Meßwert 982 (= Bild 982) eine Zeit von 62.61 Sekunden und einen Winkel W1 von -4.608° ablesen. Das heißt, das 982. Bild des Meßfilmes wurde 62.61 Sekunden nach dem Starten des Meßgeräts aufgenommen. Der Blickwinkel lag 4.608° unter jener Neigung, welche die Kamera zu Beginn der Messung hatte.

3.4.2.53 Überprüfung der Kameraführung und Meßwertkorrektur

Wenn man den Lawinnenniedergang mit der Kamera verfolgt, gelingt es nicht immer, die Peillinie im Sucher exakt an der Lawinenfront zu halten. Diese Abweichungen müssen beim Auswerten berücksichtigt und gegebenenfalls korrigiert werden.

Die Überprüfung der Kameraführung wird mit Hilfe des bei der Geländemessung belichteten Filmes durchgeführt. Zur Wiedergabe des Films verwenden wir einen Stummfilmprojektor (ELMO SP) mit Zoomobjektiv (F1.1, 12.5-25mm). Die Geschwindigkeit ist stufenlos zwischen 24 Bilder/sec und 4.6 Bilder/sec im Vor- und Rückwärtslauf regulierbar. Außerdem besitzt der Projektor eine Standbildprojektion. Der Film kann dabei per Hand von Bild zu Bild weitertransportiert werden. Wir rüsteten den Projektor mit einem elektronischen Zählwerk aus, das eine exakte Bildzählung im Vorwärts- und Rückwärtslauf erlaubt. Das Zählwerk arbeitet auch bei manuellem Filmtransport. Damit ist jedes Filmbild über seine Nummer gezielt ansprechbar.

Als Projektionsleinwand dient eine kunststoffbeschichtete Holzplatte. Auf dieser Holzplatte ist eine horizontale Markierungslinie angebracht. Beim Aufstellen des Projektors und der Projektionswand muß man darauf achten, daß die Markierungslinie exakt in der Mitte des projizierten Bildes liegt. Damit gibt die Markierungslinie auf der Projektionswand die Lage der Peillinie im Kamerasucher wieder. Wenn man bei der Geländeaufnahme die Peillinie direkt an der Front der Lawine gehalten hat, muß sich die Lawinenfront auch bei der Wiedergabe an der Markierungslinie befinden.

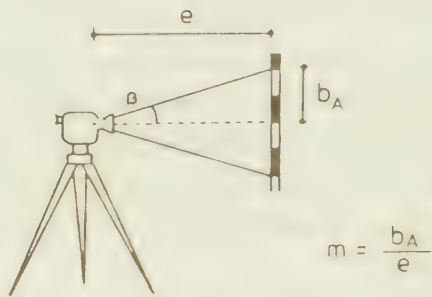
Beim Betrachten des Meßfilms achtet man nun darauf, bei welchen Bildnummern die Visierlinie direkt an der Front lag und wo man beim Nachführen der Kamera der Lawinenfront vorauseilte oder nachhinkte. Für das kontinuierliche Ermitteln der Frontbewegung ist es notwendig, diese "fehlerhaften" Meßwerte zu berichtigen. Da beim Messen im Gelände die Brennweiteinstellung der Kamera konstant gehalten wurde, ist eine nachträgliche Meßwertkorrektur möglich. Wir wollen sie mit Hilfe der Abb.22 rechnerisch durchführen:

Im Anschluß an die Lawinenmessung filmte man, wie in Abschnitt 3.4.2.4 beschrieben, mit unveränderter Kameraeinstellung eine Meßplatte. Außerdem wurde der Abstand e zwischen Meßplatte und Filmkamera (Filmebene) ermittelt.

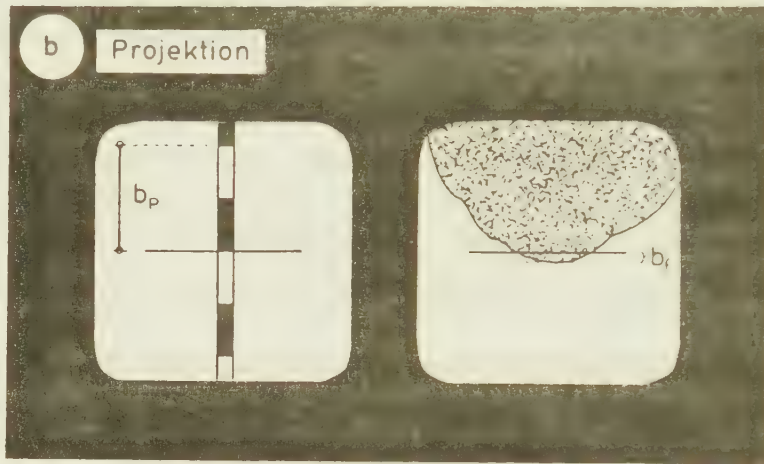
Aus einem frei wählbaren Abschnitt b_A auf der Meßplatte und der Distanz e berechnet man die Verhältniszahl $m = b_A/e$. m ist ein Maß für die Brennweiteinstellung der Kamera. Der Arcustangens von m ist der Winkel β (vgl. Abb.22a).

Die Projektion des entsprechenden Filmausschnittes gibt auf der Leinwand den Meßplattenabschnitt b_A mit der Länge b_P wieder (Abb.22b). Die Projektionslänge b_P hängt vom Abstand des Projektors zur Leinwand

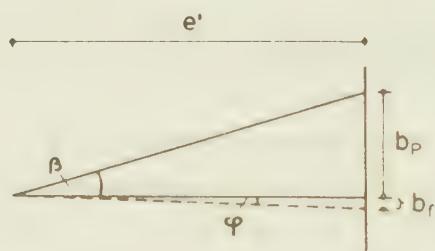
a Aufnahme im Gelände



b Projektion



$$e' = \frac{b_P}{m} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{b_r}{e'}\right)$$



und von der Einstellung des Zoomobjektivs ab, so daß bei jeder Wiedergabe des Meßfilms die Strecke b_p veränderte Werte annehmen kann. b_p kennzeichnet jedoch stets den Winkel β . Jene Punkte, die auf der Projektionswand einen Abstand zur Mittellinie von b_p aufweisen, liegen auf einer Blickgeraden, die vom im Gelände gemessenen Blickwinkel zur Mittellinie um den Winkel β abweicht. Der Blickwinkel zur Mittellinie ist der gespeicherte Meßwert. Um nun jede beliebige Abweichung von der Mittellinie erfassen zu können, errechnet man aus der Verhältniszahl m und der Projektionslänge b_p eine Hilfsgröße $e' = b_p/m$. Zu dieser Hilfsgröße e' wird jede, auf der Leinwand beobachtete Abweichung der Frontspitze von der Visierlinie in Beziehung gesetzt. Eine solche Abweichung sei b_f (Abb.22b). Der $\arctan(b_f/e')$ liefert dann den Korrekturwinkel φ , der dem jeweiligen gemessenen Winkelwert zugeschlagen oder davon abgezogen werden muß.

Nehmen wir als Beispiel an, die im Gelände gefilmte Meßlatte habe 5.0 m von der Kamera entfernt gestanden. Wir wählen einen 20 cm-Abschnitt auf der Meßlatte und erhalten als Maß für die Brennweiteinstellung eine Verhältniszahl m von

$$m = \frac{b_A}{e} = \frac{20 \text{ cm}}{500 \text{ cm}} = 0.04 \quad (14)$$

Der Winkel β mißt dann $\beta = \arctan(0.04) = 2.29^\circ$.

Bei der Projektion beansprucht der gleiche Meßlattenabschnitt auf der Leinwand eine Länge von 35 cm. Daraus errechnet man die Hilfsgröße e'

$$e' = \frac{b_p}{m} = \frac{35 \text{ cm}}{0.04} = 875 \text{ cm} \quad (15)$$

Beobachten wir nun bei der Wiedergabe des Meßfilms zum Beispiel am Bild 967 (vgl.Tab.2) ein Vorseilen der Front gegenüber der Markierungslinie von 1.5 cm, so teilen wir diese Abweichung durch e' . 1.5 cm dividiert durch 875 cm ergibt 0.0017. Der Arcustangens von 0.0017 liefert den Korrekturwinkel :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{b_f}{e'}\right) = \arctan(0.0017) = 0.098^\circ \quad (16)$$

Da die Front der Kameraführung vorseilte, muß der Korrekturwert vom gemessenen Winkel abgezogen werden. Für den 967. Meßwert erhalten wir dann:

$$\begin{array}{rcll} \text{Meßwert} & - & \text{Korrekturwert} & = \text{Winkel zur Frontspitze} \\ \text{Bildnr.967: } & -4.428^\circ & - & 0.098^\circ & = & -4.526^\circ \end{array}$$

Ist der Winkel β klein, so läßt sich die Korrektur auch über einen Dreisatz abschätzen:

- 35 cm Abbildungslänge entsprechen 2.29°
- dann entspricht 1 cm auf der Leinwand einen Winkel von 0.0654°
- und eine Abweichung von 1.5 cm erfordert eine Korrektur von 0.098° .

Der Fehler zwischen dieser Dreisatzabschätzung und der exakten trigonometrischen Lösung beträgt weniger als 1 Promill und liegt damit deutlich unter der Meßgenauigkeit der notwendigen Längenmessungen.

Bei Lawinenmessungen wird im allgemeinen mit großen Brennweiten gearbeitet. Deshalb fallen kleine Abweichungswinkel β an, und obiger Dreisatzweg reicht für die Korrekturrechnung aus.

Die Kontrolle und Korrektur der Lawinenmeßfilme mit durchschnittlich über 1000 Bildern und damit ebensovielen Meßwerten wäre zu aufwendig, wenn jeder Meßwert gesondert begutachtet werden müßte. Man korrigiert deshalb Meßwertgruppen in der Form, daß man die Korrekturdaten für den ersten und letzten Meßwert der Gruppe angibt und die Anpassung der Zwischenwerte einem Rechnerprogramm überläßt. In der Praxis sieht das beispielsweise so aus: Der Meßwert 416 wurde direkt an der Front genommen, im Bild 450 lag die Visierlinie 2 cm vor der Front, bei Bild 482 nur noch 1 cm davor. Der 496. Meßwert traf die Front wieder genau. Der Rechner korrigiert dann innerhalb der vorgegebenen Intervalle unter der Annahme eines linearen Ansteigens bzw. Abfallens der Abweichungen. Wenn zwischen Bild 416 und 450 die Distanz von 0 auf 2 cm wuchs, so geht das Korrekturprogramm von einer durchschnittlichen Zunahme der Abweichung von $2 \text{ cm} / (450 - 416) = 0.06 \text{ cm pro Bild}$ aus. Bis zum Meßwert 482 sinkt die Abweichung um 0.03 cm, anschließend um 0.07 cm pro Bild. Am Meßwert 496 ist der Korrekturwinkel φ wieder 0.

Die Trennpunkte für die gruppenweise Korrektur sind so zu setzen, daß innerhalb der Meßwertintervalle die Veränderungen der Kameraführung tatsächlich annähernd linear verlaufen.

Die begutachteten und gegebenenfalls verbesserten Meßdaten dienen als Ausgangspunkte für die Schnittpunktberechnung mit dem Lawinenstrich. Dazu muß der Lawinenstrich als Linie im dreidimensionalen Raum bekannt sein. Der folgende Abschnitt soll den bisherigen Auswertegang kurz unterbrechen und zeigen, wie man zu einer Darstellung des Lawinenstrichs kommt, die für die Schnittpunktberechnung geeignet ist.

3.4.2.6 Die datenmäßige Erfassung des Lawinenstrichs

3.4.2.6.1 Kartenauswertung

Das Auswertemodell betrachtet jeden Lawinenstrich als Folge aneinandergereihter Geradenstücke. Die Verkettung der Geradenstücke beginnt an einem Punkt über der Anrißzone. Der Punkt soll sowohl in der Karte eingetragen sein, als auch im Gelände vom Beobachtungsstandpunkt aus exakt zu bestimmen sein. Dann kann dieser Punkt bei der Geschwindigkeitsmessung als einer der Peilpunkte verwendet werden. Die aufzunehmende geometrische Linie führt von diesem Anfangspunkt zur Anrißzone des Lawinenstrichs und entlang der beobachteten oder vermuteten Stromlinie zum Endpunkt des Strichs. Es erleichtert die Auswertung, wenn man den Geradenzug über den Endpunkt des Lawinenstrichs hinaus fortsetzt und den Beobachtungsstandpunkt mit einbindet. Die Daten für ein derartiges räumliches Linienwerk kann man vermessungstechnisch im Gelände erheben oder guten Kartenwerken entnehmen.

In Bayern liegen für den Hochgebirgsbereich photogrammetrische Luftbildauswertungen im Maßstab 1 : 10 000 vor. Die Höhenlinien dieser Karten weisen eine maximale Höhendifferenz von 20 m auf. Das photogrammetrische Erstellungsverfahren erlaubt punktuelle Höhenbestimmungen mit einer Meßgenauigkeit von ± 30 cm. Höhenlinien, die aus der Interpolation zwischen den einzelnen Höhenpunkten entstanden sind, können einen etwas größeren möglichen Fehler aufweisen. Die maximalen Abweichungen liegen im offenen Gelände jedoch nicht über 0.5 - 0.7 m.^{*)} Diese Genauigkeit reicht für die Beschreibung großer Lawinenstriche im allgemeinen aus.

Zur Bestimmung des Geradenzugs zeichnet man den Verlauf des Lawinenstrichs und die vermutete Stromlinie in die Kartenunterlage ein. Entlang dieser Linie rückt man dann von Höhenlinie zu Höhenlinie vor, entnimmt jeweils deren Absoluthöhen und mißt den Horizontalabstand ΔL zwischen je zwei Höhenlinien. Auch der Richtungswinkel ϵ , des Abschnitts ΔL wird erfaßt. Der Winkel ϵ ist die im Uhrzeigersinn gemessene Abweichung von der Nordrichtung. In der Abb.23 ist die Methode kurz skizziert. Die angegebenen trigonometrischen Umrechnungsformeln führen zu Länge Δs und Neigungswinkel β des jeweiligen Geradenabschnitts.

^{*)} Mündl. Mitteilung von Herrn Huber, Bayerisches Landesvermessungsamt

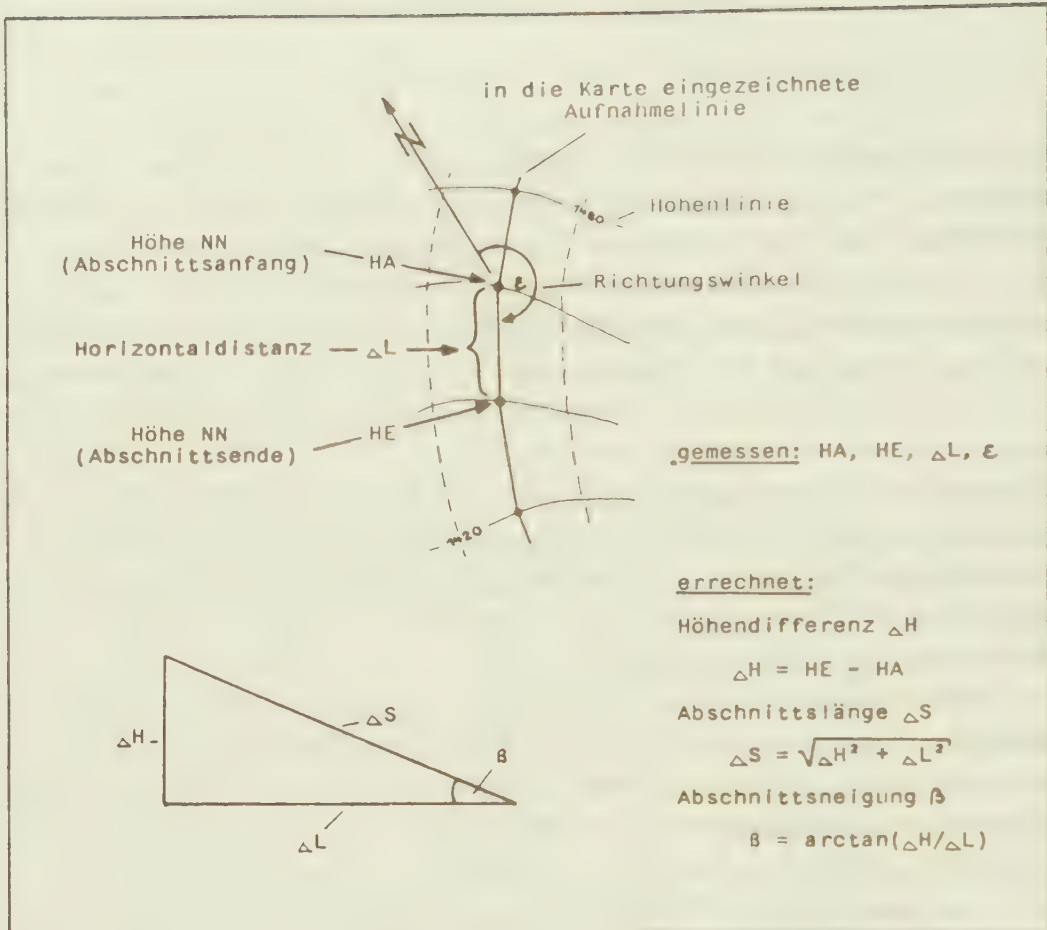


Abb.23 Schema der Kartenauswertung zur Darstellung des Lawenstrichlängsprofils

3.4.2.62 Geländevermessung

Vermißt man den Lawenstrich im Gelände mit Maßband, Neigungsmesser und Gebirgsbussole, so erhält man die Länge ΔS des in Abb.23 skizzierten Meßabschnitts, seine Neigung β und die Richtung und kann daraus die Höhendifferenz ΔH und Horizontalprojektionslänge ΔL errechnen. Kartenauswertung und Geländevermessung liefern damit die gleichen Ausgangsgrößen für die weitere Bearbeitung.

Lawenstriche wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur dort im Gelände vermessen, wo keine 1 : 10 000 - Höhenlinienkarten vorlagen, oder wo das Lawenstrichprofil aus der Karte nicht exakt zu entnehmen war. Das betraf vor allem kleinere Lawenstriche (vgl. Lawenstrich Tegelberg, Abb.8, S.26). Auf kurzen, überschaubaren Lawenstrichen

bietet sich im allgemeinen auch die Möglichkeit, die Vermessungsarbeiten während des Winters durchzuführen. Damit erhält man ein Bild des schneebedeckten Geländes. Unebenheiten, die nur im ausgeaperten Zustand zu erkennen sind und keinen Einfluß auf die Lawinenbewegung haben, bleiben hierbei auch im Geländeprofil unberücksichtigt.

Große Lawinenstriche können häufig nur in den Sommermonaten begangen werden. Der dann gewonnene Eindruck verleitet oft dazu, sowohl Bahnknicken als auch Geländeunebenheiten mit aufzunehmen, die im Winter zugeweht oder durch kleinere Schneerutsche aufgefüllt sind. Diese Geländestellen haben für die Lawinenbewegung keine besondere Bedeutung. Es erscheint deshalb sinnvoll, bei der Datenerfassung an Lawinenstrichen mit vielen kleinen Unebenheiten auf die etwas vereinfachende Kartendarstellung zurückzugreifen.

Im Bayerischen Alpenraum weisen sehr viele Lawinenstriche Felsabsätze und Steilstufen auf. Sie sind dann nicht in ihrer ganzen Länge begehbar. In solchen Fällen muß man zwangsläufig Karten oder Luftbilder zu Hilfe nehmen, um vollständige Längsprofile zu erhalten.

3.4.2.63 Tabellarische Lawinenstrichübersicht und Längsprofilzeichnung

Die gemessenen und errechneten Lawinenstrichdaten werden in einer Tabelle zusammengestellt und in gleicher Form im Computer gespeichert. Die tabellarische Auflistung (Tab.3, S.74) enthält die fortlaufenden Nummern der einzelnen Bahnpunkte (PKT) und der Geradenabschnitte (SEG). Für jedes geradlinige Bahnsegment sind dessen Länge Δs (LAENGE) und der Neigungswinkel β (WINKEL) sowie der Höhenunterschied ΔH (DELT-H) und die Horizontalprojektionslänge ΔL (DELT-L) angegeben (vgl. Abb.23). Die Spalte "H-(NN)" enthält die Absoluthöhe der einzelnen Bahnpunkte und unter "L-HORZ" sind die Horizontalabstände der Segmente vom Anfangspunkt ausgehend aufsummiert. Die in Grad angegebenen Richtungen der Bahnabschnitte findet man in der Spalte "RCH".

In der tabellarischen Übersicht können einzelnen Bahnpunkten unter "MM" beliebige Kennungen zugeordnet werden. In der Tabelle 3 erinnert 'W' beispielsweise daran, daß der Lawinenstrich dort einen Weg kreuzt. Mit 'BP' ist der Beobachterstandpunkt gekennzeichnet. .

Der Lawinenstrich in Tabelle 3 wurde so erfaßt, daß Segmente von annähernd 20 m Länge entstanden. Das erleichtert auf dem Lawinenstrich angestrebte Vergleichsrechnungen mit theoretischen Rechenmodellen (z.B. Computermode'll "AVALNCH", LANG u.a. 1979). Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen wird durch diese Abschnittsbildung nicht beeinflusst.

KENNUNG: CHR11								
ORT: HIMMELSSCHROFEN, STRICH 6								
KARTENBLATT: TK 25:8627								
AUFNAHMEMETHODE: KARTENAUSWERTUNG (1: 10000.)								
BEMERKUNGEN:								
PKT	SEG	LAENGE	WINKEL	DELT-H	DELT-L	H-(NN)	L-HORZ	RCH MM
1						1601.0	0.0	50.
2	1	1.0	-90.0	-1.0	0.0	1600.0	0.0	50.
3	2	20.0	-33.8	-11.1	16.6	1588.9	16.6	50.
4	3	20.0	-33.8	-11.1	16.6	1577.8	31.2	50.
5	4	20.0	-33.8	-11.1	15.9			50.
25							316.3	90.
26	25	20.0	-33.8	-11.1	16.6	1329.0	392.9	90.
27	26	20.0	-36.1	-11.8	16.2	1317.2	409.1	94.
28	27	20.0	-37.7	-12.2	15.8	1305.0	424.9	94.
29	28	19.9	-34.6	-11.3	16.4	1293.6	441.3	94.
30	29	20.0	-33.8	-11.1	16.6	1282.5	457.9	94.
31	30	19.9	-32.1	-10.6	16.9	1272.0	474.8	94.
32	31	19.9	-32.1	-10.6	16.9	1261.4	491.7	94.
33	32	20.0	-35.2	-14.2	14.1			94.
72							1202.9	93.
73	72	20.0	-19.0	-6.5	18.9	908.6	1221.8	93. W2
74	73	20.0	0.0	0.0	20.0	908.6	1241.8	93.
75	74	230.4	4.1	16.4	229.8	925.0	1471.6	63. BP

Tab.3 Ausschnitt aus der Liste der abschnittsweise ermittelten Kenndaten eines Lawenstrichs

Zum Zeichnen des Lawenstrichlängsprofils greift ein Computerprogramm auf die gespeicherten Tabellenwerte zurück. Das Programm steuert einen Plotter, der eine Tuschezeichnung des zur Geraden gestreckten Längsprofils liefert. Das Original der Längsprofilzeichnung in Abb.14 (S.38) entstammt diesem Zeichenprogramm.

3.4.2.64 Dreidimensionale Koordinatendarstellung der Lawenstrichpunkte

Das graphische Bild des Lawenstrichlängsprofils liefert zwar Eindrücke der Form des Lawenstrichs, für die weitere Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen ist diese zweidimensionale Zeichnung aber nur am Rande verwendbar. Zum Bestimmen der gefilmten Lagepunkte der Lawinenfront braucht man eine dreidimensionale Darstellung der vermessenen Lawenstrichlinie. Um sie zu erhalten, gehen wir vom Punkt 1 der Lawenstrichtabelle (Tab.3) aus. Dieser Anfangspunkt erhält als X- und Y-Koordinate jeweils den willkürlich gewählten Wert 10 000. Als Z-Koordinate setzt man die gemessene oder errechnete Absoluthöhe ein. Von diesem Punkt aus werden fortschreitend die Koordinaten der anderen Eckpunkte zwischen den Bahnsegmenten berechnet. Zur Erläuterung des Rechengangs greifen wir aus Tab.3 das Bahnsegment 29 heraus. Es verbindet die Punkte 29 und 30.

Aus der Tab.4 lesen wir für den Bahnpunkt 29 die Koordinaten (10391.0, 10157.9, 1293.6) ab. Von diesen Koordinaten führen die Daten des Segments Nr.29, die der Tabelle 3 zu entnehmen sind, zur räumlichen Lage des Punktes 30: Die Z-Koordinate des Punktes Nr.30 wird direkt aus der Tab.3 übernommen. Diese Koordinate stellt die absolute Höhe des Bahnpunktes (1282.5 m) dar. Die X-Koordinate erhält man, wenn man ΔL mit dem Sinus des Richtungswinkel (Tab.3, Spalte 'RCH') multipliziert und das Ergebnis zur X-Koordinate des Bahnpunkts 29 addiert.

$$\begin{array}{rcll} \text{Pkt.29 (X)} + \text{Seg.29 (DELTA-L)} \cdot \sin(\text{RCH}) & = & \text{Pkt.30 (X)} & (17) \\ 10391.0 & + & 16.6 \cdot \sin(94^\circ) & = & 10407.6 \end{array}$$

Entsprechend errechnet man die Y-Koordinate mit Hilfe des Cosinus und der Gleichung

$$\begin{array}{rcll} \text{Pkt.29 (Y)} + \text{Seg.29 (DELTA-L)} \cdot \cos(\text{RCH}) & = & \text{Pkt.30 (Y)} & (18) \\ 10157.9 & + & 16.6 \cdot \cos(94^\circ) & = & 10156.7 \end{array}$$

Die Koordinaten des Punktes 30 weichen in Tab.4 geringfügig von den soeben errechneten Zahlen ab. Der Grund liegt in der Rechengenauigkeit im Kommastellenbereich.

Die Tabelle 4 zeigt einen Ausschnitt aus einer Computerdatei. Diese Datei enthält die Koordinaten der einzelnen Bahnpunkte und in der letzten Zeile die Koordinaten des Beobachterstandpunktes. Mit diesen Zahlen und mit den Zeit-Winkelwerten der Tabelle 2 (S.65) können wir nun die gefilmten Lagepunkte der Lawinenfront berechnen.

KOORDINATEN DER BAHNPUNKTE, DREIDIMENSIONAL			CHR 11
PKT	X	Y	Z
1	10000.0000	10000.0000	1601.0000
2	10000.0000	10000.0000	1600.0000
3	10012.7148	10010.6680	1588.8700
4	10025.4297	10021.3159	1577.7480
5	10038.6094	10032.0647	1566.6180
6	10051.7891	10042.8136	1555.4880
26	10342.7031	10160.1816	1120.2177
27	10358.9023	10160.1816	1117.7756
28	10374.6602	10159.0781	1104.9051
29	10391.0195	10157.9336	1093.6448
30	10407.5781	10156.7734	1082.5188
31	10424.4336	10155.5937	1071.9438
32	10441.2891	10154.4141	1061.3687
33	10458.1446	10153.2345	1050.7937
69	11094.1523	10101.8750	957.0508
70	11112.4258	10100.9141	932.1582
71	11130.6992	10099.9531	924.2809
72	11148.2734	10099.0312	914.9149
73	11167.1445	10098.0321	908.4634
74	11187.1133	10096.9922	908.0000
75	11391.8633	10201.3164	924.9363

Tab.4 Ausschnitt aus der Datei mit den dreidimensionalen Koordinaten der einzelnen Lawenstrichpunkte

3.4.2.7 Die Ortsbestimmung der gefilmten Lawinenfront im Lawenstrich

Zu jedem Bild des Meßfilms kann man rechnerisch die Lage der Lawinenfront im Lawenstrich bestimmen. Wir verwenden dazu den in Abb.19 (S.57) skizzierten Ansatz aus der analytischen Geometrie. Der Rechengang soll an einem konkreten Zahlenbeispiel veranschaulicht werden. Dem Beispiel liegt eine Messung zugrunde, die am 20.01.83 am Himmelsschrofen bei Oberstdorf (Allgäuer Alpen) durchgeführt wurde (vgl. Tab.3). Die in Tab.2 gezeigten und auf Seite 65f angesprochenen Daten stammen von dieser Messung.

Angenommen, wir wollen jetzt wissen, an welchem Geländepunkt sich die Lawinenfront beim 982.Bild des Meßfilms befand. Um den Punkt zu finden, lesen wir aus der Meßwertetabelle (Tab.2, S.65) den zum Bild 982 gehörigen Winkelwert (W1) ab. Er beträgt -4.608° . Diese Winkelangabe ist ein Relativwert und bezieht sich auf die Kamerastellung zu Meßbeginn. Da die Messung an einem markanten Geländepunkt einsetzte, konnte die Anfangsneigung der Kamera mit einem Theodoliten überprüft werden.

In dem vorliegenden Meßbeispiel lag die Anfangsneigung bei 24.66° . Zieht man von dieser Zahl den Wert 4.608 ab, so erhält man den absoluten, auf die Horizontale bezogenen Blickwinkel des 982.Bildes. Er mißt 20.052° . Jeder Punkt im Gelände, der vom Beobachtungsstandpunkt unter diesem Winkel anvisiert wird, liegt auf einem Kreiskegel, mit der allgemeinen Gleichung (vgl.Abb.19):

$$(s_1 - m_1)^2 + (s_2 - m_2)^2 + \frac{(s_3 - m_3)^2}{\tan^2 \gamma} = 0 \quad (19)$$

Dieser Kegel hat eine Mantelflächenneigung von 20.052° und als Mittelpunkt den Beobachterstandpunkt (11391.86, 10201.32, 924.94). Seine Gleichung lautet:

$$(s_1 - 11391.86)^2 + (s_2 - 10201.32)^2 + \frac{(s_3 - 924.94)^2}{\tan^2(20.052)} = 0 \quad (20)$$

Wo schneidet dieser Kreiskegel die geometrische Lawenstrichdarstellung? Wir nehmen an, wir hätten die einzelnen Geradenstücke des Lawenstrichs in Tab.3 und Tab.4 von der Anrißzone her bis zum Punkt 28 durchgetestet. Bislang sei kein Schnittpunkt gefunden worden. Nun ist zu überprüfen, ob der Kreiskegel die Lawenstrichlinie zwischen den Bahnpunkten 28 und 29 trifft.

Der Richtungsvektor dieser geradlinigen Teilstrecke lautet:

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} 10391.02 \\ 10157.94 \\ 1293.65 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 10374.66 \\ 10159.08 \\ 1304.94 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.36 \\ -1.14 \\ -11.29 \end{pmatrix} \quad (21)$$

Die vektorielle Punkt-Richtungsform des Geradenstücks zwischen den Punkten 28 und 29 heißt damit:

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10374.66 \\ 10159.08 \\ 1304.94 \end{pmatrix} + \zeta \cdot \begin{pmatrix} 16.36 \\ -1.14 \\ -11.29 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Um den Schnittpunkt der Gerade mit dem Kreiskegel zu finden, setzen wir die Geradenkomponenten s_1 , s_2 und s_3 anstelle der s_1 -, s_2 - und s_3 -Werte in die Kegelgleichung ein. Wir erhalten damit eine quadratische Gleichung mit einer Unbekannten ζ .

$$(10374.66 + 16.36 \zeta - 11391.86)^2 + (10159.08 - 1.14 \zeta - 10201.32)^2 - \frac{(1304.94 - 11.29 \zeta - 924.94)^2}{\tan^2(20.052)} = 0 \quad (23)$$

Die Auflösung nach $\bar{G}$ führt zur Form

$$\bar{G}^2 - 45.39 \cdot \bar{G} = -68.94 \quad (24)$$

und zu den beiden Lösungen

$$\begin{aligned} \bar{G}_1 &= 43.815 \\ \bar{G}_2 &= 1.575 \end{aligned}$$

Setzt man diese Werte in die Geradengleichung (22) ein, so erhält man die s_3 -Werte 810.3 und 1287.2. Keiner der beiden Werte liegt zwischen den absoluten Höhen (Z) der Bahnpunkte 28 und 29 (vgl. Tab.3, S.74). Der Kegel schneidet den Lawinenstrich im Geradenstück Nr.28 nicht.

Wir schreiten deshalb zum nächsten Abschnitt 29 vor und führen die Berechnung in der gleichen Weise durch. Die Kegelgleichung (20) wird diesmal mit dem Geradenstück zwischen den Punkten 29 und 30

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10391.02 \\ 10157.94 \\ 1293.65 \end{pmatrix} + \bar{G} \cdot \begin{pmatrix} 16.56 \\ -1.16 \\ -11.12 \end{pmatrix} \quad (25)$$

zum Schnitt gebracht. Die Rechnung ergibt die Lösungen

$$\begin{aligned} \bar{G}_1 &= 43.07 \\ \bar{G}_2 &= 0.60 \end{aligned}$$

$\bar{G}_1$ führt in der Geradengleichung (25) zu einem s_3 -Wert, der anzeigt, daß der Schnittpunkt nicht auf dem ausgewählten Abschnitt liegt. Setzen wir $\bar{G}_2$ in die Gleichung ein, so gilt

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10391.02 \\ 10157.94 \\ 1293.65 \end{pmatrix} + 0.60 \cdot \begin{pmatrix} 16.56 \\ -1.16 \\ -11.12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10400.96 \\ 10157.24 \\ 1286.98 \end{pmatrix} \quad (26)$$

Wir sehen anhand des s_3 -Wertes, daß der Punkt (s_1, s_2, s_3) auf dem Geradensegment zwischen den Bahnpunkten 29 und 30 liegt (vgl. Tab.3) und haben den gesuchten Schnittpunkt gefunden.

Mit Hilfe eines Rechenprogrammes wird diese Prozedur für jeden aufgenommenen Meßwert durchgeführt. Die gefundenen Schnittpunkte speichert das Programm. Die Tabelle 5 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Datenspeicher.

LAWINENEREIGNIS: CHR11/9830120						AUSWERTE-DATUM: 260883		
BILD G:01-V1	ZEIT	WINKEL (24.7)	SCHNITTPUNKTKOORDINATEN			ZWISCHEN	ABSTAND	BILD
			X	Y	Z	PO	PU VON PO	
1	0.0	24.660	-1318.133	-139.461	1533.475	7	8 17.16	1
2	0.041	24.660	-1318.133	-139.461	1533.475	7	8 17.16	
3	0.083	24.660	-1318.133	-139.461	1533.475	7	8 17.16	
	0.125			-139.461			8	
					-139.461			
965	40.212	20.232	-1002.430	-43.271	1294.741	28	29 17.98	966
968	40.212	20.232	-1002.430	-43.271	1294.741	28	29 17.98	968
969	40.253	20.214	-1001.324	-43.355	1293.977	28	29 19.33	969
970	40.295	20.196	-1000.184	-43.434	1293.202	29	30 0.79	970
971	40.336	20.178	-999.016	-43.516	1292.418	29	30 2.20	971
972	40.378	20.142	-996.691	-43.680	1290.856	29	30 5.01	972
973	40.419	20.142	-996.691	-43.680	1290.856	29	30 5.01	973
974	40.461	20.142	-996.691	-43.680	1290.856	29	30 5.01	974
975	40.503	20.142	-996.691	-43.680	1290.856	29	30 5.01	975
976	40.544	20.106	-994.379	-43.840	1289.301	29	30 7.80	976
977	40.586	20.088	-993.227	-43.922	1288.527	29	30 9.19	977
978	40.627	20.070	-992.074	-44.004	1287.754	29	30 10.58	978
979	40.669	20.070	-992.074	-44.004	1287.754	29	30 10.58	979
980	40.711	20.070	-992.074	-44.004	1287.754	29	30 10.58	980
981	40.752	20.070	-992.074	-44.004	1287.754	29	30 10.58	981
982	40.794	20.052	-990.930	-44.082	1286.985	29	30 11.96	982
983	40.836	20.034	-989.785	-44.164	1286.216	29	30 13.34	983
984	40.877	20.016	-988.645	-44.242	1285.449	29	30 14.72	984
985	40.919	19.998	-987.508	-44.324	1284.685	29	30 16.09	985
986	40.960	19.962	-985.238	-44.480	1283.162	29	30 18.83	986
987	41.002	19.944	-984.082	-44.563	1282.393	30	31 0.24	987
988	41.044	19.926	-982.770	-44.656	1281.568	30	31 1.79	988
989	41.085	19.926	-982.770	-44.656	1281.568	30	31 1.79	989
	41.127	19.926		-44.656	1281.568		31 1.79	
	41.169	19.926		-44.656	1281.568			

Tab.5 Ausschnitt aus der Ergebnisliste mit den errechneten Schnittpunkten zwischen den, aus gemessenen Beobachtungswinkeln abgeleiteten Kreiskegeln und dem Lawinenstrich

Die X-, Y-, und Z-Koordinaten der einzelnen Schnittpunkte findet man in den entsprechend überschriebenen Spalten in der Tabellenmitte. Die X- und Y- Werte wurden vor dem Abspeichern so umgerechnet, daß der Meßgerätestandpunkt die Koordinaten (0, 0, m ü. NN) erhält. Das vereinfacht die weiteren Auswertungen. Beim Umrechnen subtrahiert man die X- und Y-Koordinatenwerte des Meßgerätestandorts von den entsprechenden Zahlen der Schnittpunkte. So hatten wir für den Meßwinkel 982 einen X-Wert von 10400.96 ermittelt. Ziehen wir davon die X-Koordinate des Beobachtungsstandpunkts (11391.86, vgl. Tab.4) ab, so erhalten wir -990.9. Diese Zahl erscheint in der Tabelle 5. Für die Y-Koordinate verläuft die Umrechnung analog.

Das Rechenprogramm korrigiert auch die Zeitangabe in der 2.Spalte so, daß die Zählung zum Zeitpunkt der Detonation bei 0 beginnt. Der Tabelle 2 (S. 65) läßt sich entnehmen, daß die Meßapparatur bereits 21.8 Sekunden lief, als die Lawinenauslösung stattfand.

Mit diesen Erklärungen können wir die Zahlenreihen der Tabelle 5 lesen. Als Beispiel dient wieder das Bild 982. Es wurde 40.79 Sekunden nach der Lawinenauslösung aufgenommen. Die Kameraneigung betrug dabei 20.05° gegenüber der Horizontalen. Die an der Visierlinie liegende Lawinenfront befand sich im Augenblick der Beobachtung an einem Geländepunkt mit den angegebenen Schnittpunktkoordinaten (-990.93, -44.08, 1286.99). Dieser Geländepunkt liegt zwischen den Bahnpunkten 29 und 30 im Längsstrichprofil und zwar 11.96 m vom Punkt 29 entfernt.

Wir ersehen aus den Zahlen dieses Datenspeichers, wo sich die Lawinenfront zu bestimmten Zeitpunkten befand und können daraus kleinräumig die Frontgeschwindigkeiten errechnen.

3.4.2.8 Das Berechnen der Lawinenfrontgeschwindigkeiten

Die kleinräumig gemittelten Frontgeschwindigkeiten erhalten wir, wenn wir die Strecke zwischen zwei Schnittpunkten durch die Zeit dividieren, welche die Front benötigte, diese Distanz zu durchlaufen.

Der Abstand zweier Punkte im dreidimensionalen Raum ist der Betrag des Ortsvektors, der beide Punkte verbindet. Den Ortsvektor **a** von Punkt Nr.981 zum Punkt Nr.982 erhält man mit den Zahlen der Tab.5

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} -990.93 \\ -44.08 \\ 1286.99 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -992.07 \\ 44.00 \\ 1287.75 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.14 \\ 0.08 \\ -0.76 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Sein Betrag ist die Quadratwurzel aus der Summe der Komponentenquadrate. (28)

$$|\mathbf{a}| = \left| \begin{pmatrix} -1.14 \\ 0.08 \\ -0.76 \end{pmatrix} \right| = \sqrt{(-1.14)^2 + 0.08^2 + (-0.76)^2} = \sqrt{1.88} = 1.37$$

Die Punkte 981 und 982 liegen im Lawinenstrich 1.37 m auseinander. Den Punkt 981 erreichte die Lawinenfront 40.75 Sekunden nach der Auslösung (vgl. Tab.5). 0.042 Sekunden später befand sich der beobachtete Teil der Front am Punkt 982. Aus der Entfernungs- und Zeitangabe ermitteln wir eine Geschwindigkeit von

$$v_m(F) = \frac{1.37 \text{ m}}{0.042 \text{ sec}} = 32.6 \text{ m/s} \quad (29)$$

In der Tabelle 6 finden wir den entsprechenden Wert in der zweiten Spalte von rechts ("v") in der Zeile mit der Bildnummer 982. Abweichungen im Kommastellenbereich beruhen auf der höheren Rechengenauig-

keit des Computers. Die Klammer zwischen der Bildnummer und dem Geschwindigkeitswert beinhaltet Kennzahlen für die Größe des Berechnungsintervalls. (1,0) bedeutet, daß der errechnete Geschwindigkeitsmittelwert für die Strecke zwischen den Punkten 982-1 und 982+0, also für die Verbindung zwischen 981 und 982 gilt.

LAWINENEREIGNIS: CHR11/9830120							(260883)	
CUM-L (M)	HOEHE (MNN)	CUM-S (M)	ZEIT (SEC)	BILD NR	INTER (-,+)	V (M/S)	GESCHWINDIGKEIT (1* = 10 M/S)	
0.0	1533.48	0.0	0.0	1	(1,0)	0.0		
0.0	1533.48	0.0	0.0411	2	(1,0)	0.0		
0.0	1533.48	0.0	0.0831	3	(1,0)	0.0		
0.0	1533.48	0.0	0.1251	4	(1,0)	0.0		
343.27	1291.74	419.57	40.2111	967	(1,0)	0.0		
344.38	1291.98	420.92	40.2531	969	(1,0)	32.83	***	
345.52	1291.20	422.10	40.2951	970	(1,0)	32.88	***	
346.69	1292.42	423.71	40.3361	971	(1,0)	34.36	***	
349.02	1290.86	426.51	40.3781	972	(1,0)	66.80	*****	
349.02	1290.86	426.51	40.4191	973	(1,0)	0.0		
349.02	1290.86	426.51	40.4611	974	(1,0)	0.0		
349.02	1290.86	426.51	40.5031	975	(1,0)	0.0		
351.34	1289.30	429.30	40.5441	976	(1,0)	68.07	*****	
352.50	1288.53	430.69	40.5861	977	(1,0)	33.10	***	
353.65	1287.75	432.08	40.6271	978	(1,0)	33.92	***	
353.65	1287.75	432.08	40.6691	979	(1,0)	0.0		
353.65	1287.75	432.08	40.7111	980	(1,0)	0.0		
353.65	1287.75	432.08	40.7521	981	(1,0)	0.0		
354.80	1286.99	433.46	40.7941	982	(1,0)	32.86	***	
355.95	1286.22	434.85	40.8361	983	(1,0)	32.90	***	
357.09	1285.45	436.22	40.8771	984	(1,0)	33.56	***	
358.23	1284.69	437.59	40.9191	985	(1,0)	32.66	***	
360.50	1283.16	440.33	40.9601	986	(1,0)	66.77	*****	
361.66	1282.39	441.72	41.0021	987	(1,0)	33.12	***	
362.98	1281.57	443.27	41.0441	988	(1,0)	36.96	***	
362.98	1281.57	443.27	41.0851	989	(1,0)	0.0		
362.98	1281.57	443.27	41.1271	990	(1,0)	0.0		
362.98	1281.57	443.27	41.1691	991	(1,0)	0.0		
364.29	1280.75	444.83	41.2101	992	(1,0)	37.84	***	
364.29	1280.75	444.83	41.2521	993	(1,0)	0.0		
365.60	1279.93	446.48	41.2931	994	(1,0)	33.88	***	

Tab.6 Ausschnitt aus der Datenliste mit den errechneten unbereinigten Geschwindigkeiten

Tabelle 6 zeigt Abschnitte mit einer Geschwindigkeit von 0 m/s und daneben sehr hohe Geschwindigkeitsangaben von über 60 m/s. Diese abrupten Sprünge sind in der Meßtechnik und in der Unzulänglichkeit der manuellen Handhabung der Kamera begründet. Es ist nie möglich, die Kamera ganz flüssig der Frontbewegung nachzuführen. Auch wenn man die Visierlinie immer exakt an der Front hält, so führt man unbewußt doch eine leicht zitternde Bewegung durch. Dieses Vibrieren ist auf dem Film nicht zu erkennen und kann durch die nachträgliche Meßwertekorrektur (vgl. Abschn.3.4.2.53) nicht bereinigt werden. Die hohe Frequenz der Datenaufzeichnung erfaßt jedoch diese Unruhe. Ein Innhalten von 0.13 Sekunden Dauer bewirkt beispielsweise, daß 3 Bilder hintereinander auf

denselben Geländepunkt gerichtet sind. Die Berechnung liefert dann dort die Geschwindigkeiten 0 m/s. Umgekehrt führen kurze ruckhafte Bewegungen zu extrem hohen Geschwindigkeitsangaben in der Auswertetabelle (vgl. Tab.6).

Um zu sinnvollen Ergebnissen zu gelangen, müssen die Meßwertreihen geglättet werden.

3.4.2.9 Die Glättung der Meßwertreihen

Die Meßwertreihen kann man mit Hilfe mathematischer Ausgleichsfunktionen oder durch das Berechnen gleitender Mittelwerte glätten. Die mathematischen Funktionen erfordern bei der Datenfülle einen sehr hohen Rechenaufwand. Deshalb wurden sie nicht weiter berücksichtigt.

Wesentlich einfacher ist eine gleitende Mittelwertbildung. Dabei nimmt man zum Beispiel den 1., 2. und 3. Wert einer Meßreihe, mittelt diese Zahlen und ordnet den errechneten Durchschnittswert der Intervallmitte, also dem 2. Meßwert zu. Dann mittelt man die Meßresultate Nummer 2, 3 und 4 und berechnet daraus den Wert für das 3. Glied der Meßreihe. Über den Durchschnitt des 3., 4. und 5. Zahlenwerts wird die Berechnung bis zum Ende der Meßreihe fortgesetzt. Die gleitenden Mittel beruhen stets auf den Originaldaten.

Bei der Aufbereitung der Geschwindigkeitsmessung setzten wir diese Art der Glättung zweifach ein. Der erste Glättungsgang betraf die absoluten Höhen (HOEHE), die aufsummierten Horizontalabstände (CUM-L) und die Schrägentfernung (CUM-S) der Frontlagepunkte (vgl. Tab.6). Das über die Zahlenreihen hinwegwandernde Berechnungsintervall war fünf Meßwerte breit, das heißt, der Durchschnitt aus 5 Zahlen wurde jeweils der Bildnummer in der Intervallmitte zugeordnet. Dabei nahmen neu errechnete Meßwerte an der weiteren Durchschnittsbildung nicht teil.

Aus den Tabellen 6 und 7 ist der Effekt dieser Glättung gut zu erkennen. In den zweiten Spalten dieser Tabellen sind die absoluten Höhen der einzelnen Beobachtungspunkte aufgelistet. Nach Tabelle 6 war die Kamera beim Filmen der Bilder 978 bis 981 auf ein und denselben Punkt gerichtet. Die Höhenangaben in der Tabelle bleiben in dem Bereich unverändert. Erst zum Punkt 982 hin verändert sie sich wieder. Die Glättung beseitigt solche abrupten Sprünge und führt zu einem allmählichen Absinken der Höhenwerte (vgl. Tab.7).

Die aufsummierten Horizontalabstände und Schrägentfernungen wurden entsprechend geglättet. Den Hinweis auf die gleitende Mittelwertbildung findet man in der Kopfzeile des Datenspeichers. Die dort angeführte

LAWINENEREIGNIS: CHR11/9830120				GLM: (ALL= 5,V=8)		(260883)	
CUM-L (M)	HOEHE (MNN)	CUM-S (M)	ZEIT (SEC)	BILD NR	INTER (-,+)	V (M/S)	GESCHWINDIGKEIT (1° = 4 M/S)
0.0	1533.48	0.0	0.0	1	(4,4)	0.0	1
0.0	1533.48	0.0	0.0411	2	(4,4)	0.0	1
0.0	1533.48	0.0	0.0831	3	(4,4)	0.0	1
0.0	1533.48	0.0	0.1251	4	(4,4)	0.0	1
343.83	1294.36	420.25	40.2121	968	(4,4)	20.62	*****
344.40	1293.97	420.94	40.2531	969	(4,4)	20.71	*****
345.36	1293.32	422.10	40.2951	970	(4,4)	22.21	*****
346.32	1292.67	423.25	40.3361	971	(4,4)	24.36	*****
347.28	1292.03	424.41	40.3781	972	(4,4)	25.12	*****
348.05	1291.51	425.34	40.4191	973	(4,4)	25.83	*****
349.02	1290.86	426.51	40.4611	974	(4,4)	25.14	*****
349.99	1290.21	427.67	40.5031	975	(4,4)	24.46	*****
350.76	1289.69	428.60	40.5441	976	(4,4)	23.05	*****
351.53	1289.17	429.53	40.5861	977	(4,4)	22.33	*****
352.30	1288.66	430.46	40.6271	978	(4,4)	20.88	*****
353.07	1288.14	431.39	40.6691	979	(4,4)	20.14	*****
353.65	1287.75	432.08	40.7111	980	(4,4)	21.48	*****
354.23	1287.37	432.77	40.7521	981	(4,4)	23.52	*****
354.80	1286.98	433.46	40.7941	982	(4,4)	25.64	*****
355.56	1286.47	434.38	40.8361	983	(4,4)	27.07	*****
356.70	1285.71	435.76	40.8771	984	(4,4)	28.52	*****
358.04	1284.81	437.36	40.9191	985	(4,4)	29.28	*****
359.40	1283.91	439.00	40.9601	986	(4,4)	29.46	*****
360.57	1283.14	440.40	41.0021	987	(4,4)	28.26	*****
361.56	1282.49	441.58	41.0441	988	(4,4)	25.68	*****
362.35	1281.97	442.53	41.0851	989	(4,4)	22.40	*****
362.98	1281.57	443.27	41.1271	990	(4,4)	19.82	*****
363.42	1281.29	443.79	41.1691	991	(4,4)	18.69	*****
363.85	1281.02	444.31	41.2101	992	(4,4)	17.47	*****
364.29	1280.75	444.83	41.2521	993	(4,4)	18.47	*****
364.95	1280.34	445.34	41.2941	994	(4,4)	19.47	*****

Tab.7 Ausschnitt aus dem Datensatz mit dem geglätteten Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront

Kennung "GLM: (ALL= 5" besagt, daß in dieser Datenliste alle Geländewerte mit einer Intervalllänge von 5 Meßwerten gleitend gemittelt sind. "V=8" zeigt an, daß wir in einem zweiten Rechengang zusätzlich den Geschwindigkeitsverlauf glätteten. Jeder Geschwindigkeitswert ist ein Durchschnitt aus 8 Zahlen. Das Ergebnis für das 982. Bild ist die mittlere Frontgeschwindigkeit zwischen den Punkten 982-4 und 982+4; also zwischen den Punkten 978 und 986.

Diese zusätzliche Mittelwertbildung wurde durchgeführt, weil es unsinnig erschien, bei dem beobachteten Lawinenereignis mit höherer Genauigkeit zu arbeiten. Die künstlich ausgelöste Trockenschneelawine hatte nur eine Anrißhöhe von 20 bis 30 cm. Ihre Fließhöhe konnte nicht gemessen werden. Die Front der Lawine bewegte sich äußerst unruhig und war in ihrer kleinräumigen Variation mit dem Meßgerät nicht exakt zu verfolgen. Deswegen kennzeichnet in der Tabelle 7 ein Meßwert jeweils ein Beobachtungsintervall von 8 Bildern oder 0.33 Sekunden.

Es ist ein Vorteil des Meßverfahrens mit seiner Datenfülle, daß jederzeit auf größere Meßintervalle übergegangen werden kann, wenn für eine detaillierte Betrachtung die Voraussetzungen nicht gegeben sind. Bei der Interpretation der Meßwerttabellen muß man sich allerdings stets bewußt sein, für welche Teilstreckenlängen die gemittelten Frontgeschwindigkeitswerte gelten.

Das Auswerteprogramm, das die Datenliste in Tab.7 liefert, ist so konzipiert, daß die Intervalllängen für die gleitende Mittelwertbildung variabel sind.

Das Lawinenereignis, das in dieser Arbeit als Beispiel dient, hatte eine Gesamtlaufzeit von 84 Sekunden. 84 Sekunden mal 24 Bilder/Sekunde ergibt rund 2000 Bilder bzw. Meßwerte. Die Ergebnisliste mit den mittleren Frontgeschwindigkeiten hat damit, ebenso wie die anderen Datenlisten, einen Umfang von 30 engbeschriebenen DIN A4 Seiten. Um bei dieser Zahlenmenge leichter einen Überblick über die errechneten Geschwindigkeiten zu gewinnen, ergänzt eine Säulendiagrammdarstellung die Meßwerttabellen (vgl. Tab.6 und Tab.7, rechte Spalte). Einen noch deutlicheren Gesamtüberblick über das gemessene Geschwindigkeitsverhalten der Lawinenfront erhält man aus einer Zeichnung der "Geschwindigkeitslinie" über dem Längsprofil des Lawenstrichs.

3.4.2.10 Das Zeichnen der Geschwindigkeitslinie über dem Lawenstrichlängsprofil

Um die Bedeutung der Geschwindigkeitslinie zu verstehen, müssen wir uns kurz die Bewegungsgleichung des freien Falles ins Gedächtnis rufen: Wenn man einen Körper frei fallen läßt und den Luftwiderstand nicht berücksichtigt, so hängt die erreichte Geschwindigkeit allein von der Fallhöhe h ab. Die Formel lautet

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (30)$$

g ist die Erdbeschleunigung 9.81 m/s^2 .

Wir können aber auch umgekehrt fragen: Über welche Distanz muß man einen Körper fallen lassen, damit er im freien Fall eine bestimmte Geschwindigkeit erreicht. Die Antwort darauf erhalten wir, wenn wir die Gleichung (30) nach h auflösen

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (31)$$

Diese Höhe wird als Geschwindigkeitshöhe bezeichnet. WESTPHAL (1953) löst sich von der tatsächlichen Fallbewegung und definiert Geschwindigkeitshöhe als jene Höhe, die ein Körper herabfallen müßte, um eine bestimmte Geschwindigkeit zu erreichen.

Wir wollen für die Geschwindigkeitshöhe im folgenden den Ausdruck " h_v " schreiben. Die Geschwindigkeitshöhe hat eine energetische Bedeutung, denn sie ist der spezifische, auf 1 kg Masse bezogene Betrag der kinetischen Energie (vgl. LAATSCH, ZENKE, DANKERL 1981, S.64 ff).

Da die Geschwindigkeitshöhe ein Längenmaß ist, eignet sie sich besonders zur graphischen Darstellung. Haben wir zum Beispiel an einem bestimmten Punkt des Lawenstrichs eine Geschwindigkeit von 25 m/s ermittelt, so können wir daraus eine Geschwindigkeitshöhe von rund 32 m errechnen. Diese Höhe trägt man über dem entsprechenden Punkt des Lawenstrichlängsprofils an, so wie dies in Abb.24 am Punkt P dargestellt ist.

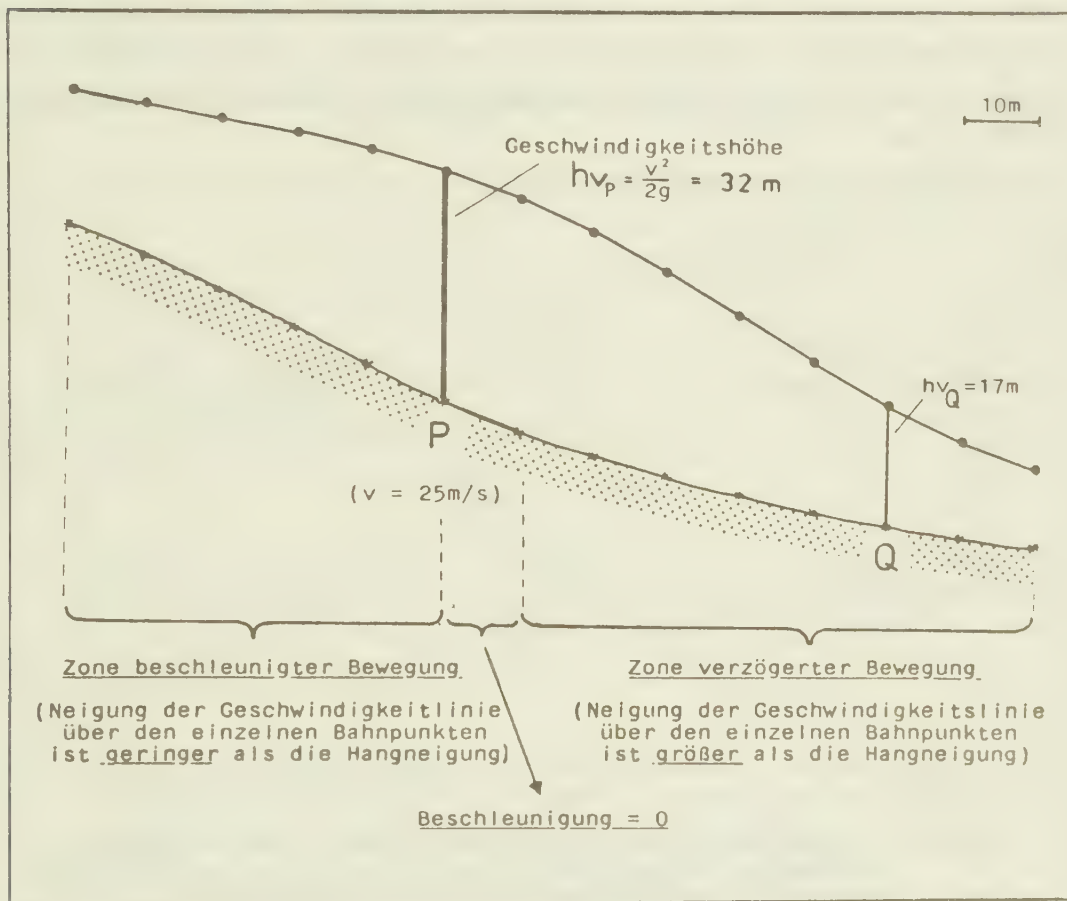


Abb.24 Die Geschwindigkeitslinie über einem Teil eines Lawenstrichlängsprofils

Ebenso verfährt man an allen anderen Bahnpunkten, für die Geschwindigkeitswerte vorliegen. Verbinden wir die Spitzen der einzelnen Geschwindigkeitshöhen, so erhalten wir die Geschwindigkeitslinie.

Aus einer Geschwindigkeitslinie kann man die Geschwindigkeiten an einzelnen Bahnpunkten abschätzen. Am Punkt Q der Abb.24 messen wir beispielsweise einen Abstand zwischen Längsprofil und Geschwindigkeitslinie von 17 m. Das ist die Geschwindigkeitshöhe $h_v(Q)$. Aus ihr berechnet man den Geschwindigkeitsschätzwert

$$v_Q = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_v(Q)} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 17 \text{ m}} = 18.3 \text{ m/s}$$

Neben diesen örtlichen Geschwindigkeitsabschätzungen gibt die Geschwindigkeitslinie einen guten Überblick über die Zonen beschleunigter und verzögerter Bewegung. Dort, wo die Geschwindigkeitslinie eine geringere Neigung als das Lawenstrichlängsprofil aufweist, ist die Bewegung beschleunigt. Nähern sich Geschwindigkeitslinie und Längsprofil, so weist das auf eine Geschwindigkeitsabnahme, also auf eine verzögerte Bewegung hin.

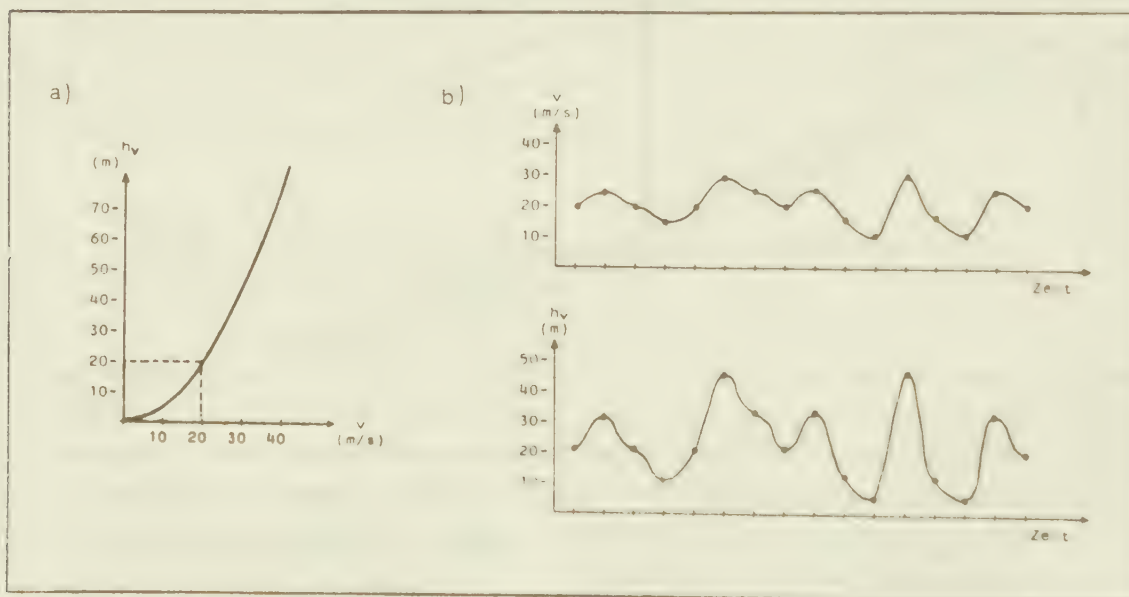


Abb.25 Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Geschwindigkeitshöhe (a) und daraus resultierende unterschiedliche Schwankungsamplituden in der Diagrammdarstellung (b).

Die Geschwindigkeitshöhe ist eine parabolische Funktion der Geschwindigkeit. Abb.25a zeigt die skizzierte Funktionskurve. Diese Kurve liefert für einen Abszissenwert von 19.6 einen Ordinatenwert gleicher Größe. Kleinere Abszissenwerte werden bei der Umrechnung mit der Parabelfunktion weiter verkleinert, über 19.6 liegende Zahlenangaben werden

vergrößert. Ein Geschwindigkeitswert von 10 m/s führt zu einer Geschwindigkeitshöhe von 5 m, und 30 m/s auf der v-Achse liefern 46 m als Ordinatenwert. Diese Eigenschaft der Parabelfunktion bewirkt, daß Schwankungen im Geschwindigkeitsverlauf in der Geschwindigkeitshöhendarstellung verstärkt zum Ausdruck kommen. Die Abb.25b stellt einen kurzen Geschwindigkeitsverlauf und die daraus berechneten Geschwindigkeitshöhen gegenüber.

In der Abb.26 wurden die errechneten und geglätteten Geschwindigkeitswerte der Kameramessung in Geschwindigkeitshöhen umgerechnet und über dem Längsprofil des Lawenstrichs "Himmelsschrofen" aufgezeichnet.

Der Verlauf der Geschwindigkeitslinie ist sehr unruhig und weist mehrfach auf abrupte Geschwindigkeitsänderungen an der Front der be-

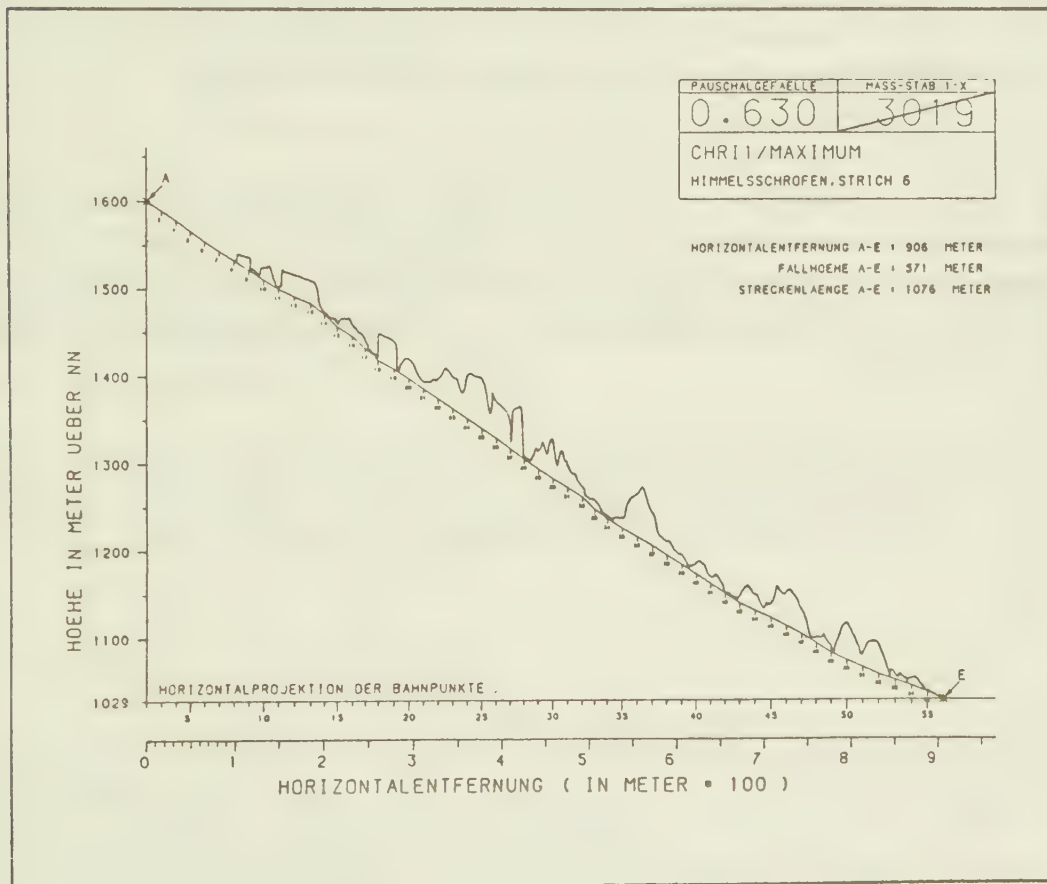


Abb.26 Geschwindigkeitslinie der Lawinenfrontbewegung auf dem Lawenstrich "Himmelsschrofen-Christles Bichl" Allgäuer Alpen (gemessen am 20.1.1983)

beobachteten Lawine hin. Solche Sprünge im Geschwindigkeitsverlauf treten auf, wenn die Lawinenfront an Hindernissen stark gebremst oder aufgehalten wird, oder wenn sehr schnelle Massenteile die langsamere Front überholen. Letzteres führt im Aufzeichnungsdiagramm zu einem plötzlichen Anstieg der Geschwindigkeitslinie der Frontbewegung.

Da die Fließhöhe der am Himmelschrofen gemessenen Lawine nur wenige Dezimeter betrug, wurde das Vorankommen der Front durch Geländeunebenheiten und -hindernisse sehr stark beeinflusst. Darüber hinaus durchlief die Lawine mehrere im Schatten liegende Lawenstrichbereiche. In diesen Bereichen waren die Sichtverhältnisse sehr schlecht. Das erschwerte beim Messen die Kameranachführung und beim Auswerten die Korrektur der Meßwerte.

Im übrigen war das vorgestellte Lawinenereignis die erste vollständige Geländemessung nach Fertigstellung des Meßgerätes im Winter 82/83. Die Lawinenmessung hatte deswegen mehr den Charakter eines Meßgerätestests und dient hier nur zum Beschreiben des Auswerteablaufs. Leider ließen die Witterungs- und Schneedeckenverhältnisse im Winter 82/83 keine weiteren Geschwindigkeitsmessungen an Lawinen mehr zu.

Die in den Abschnitten 3.4.2.5ff skizzierten Berechnungen werden durch Computerprogramme erleichtert (vgl. Anhang C). Dennoch erfordert die Auswertung einer kontinuierlichen Laufzeitmessung mehrere Tage, da man insbesondere die Meßwertekorrektur an Hand des Films sehr sorgfältig durchführen muß.

4 Rechenverfahren zum Aufbereiten gemessener Geschwindigkeiten

4.1 Ziele der Datenaufbereitung

Geschwindigkeitsmessungen sollen in erster Linie das Entwickeln von Bewegungsmodellen gestatten, mit denen man Reichweite und eventuelle Stoßdrucke möglicher Lawinen vorausberechnen kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die errechneten, für bestimmte Meßabschnitte geltenden Geschwindigkeiten zunächst einmal graphisch anschaulich dargestellt und in ihrer Bedeutung geklärt werden.

In einem zweiten Arbeitsgang gilt es, dieses Datenmaterial rechnerisch so umzuformen, daß wir typische, für Modellrechnungen brauchbare Geschwindigkeitsverlaufskurven erhalten.

Die Art der notwendigen Umformung hängt von den zur Verfügung stehenden Meßdaten ab. Liegen detaillierte, aber stark schwankende Geschwindigkeitsdaten vor, so müssen wir versuchen, den Geschwindigkeitsverlauf zu glätten. Hat man von einem Lawinenereignis nur wenige Meßdaten oder gar nur eine Gesamtlaufzeitmessung, so muß versucht werden, aus diesem kargen Datenmaterial den Geschwindigkeitsverlauf vom Anfang bis zum Ende der Bewegung abzuleiten.

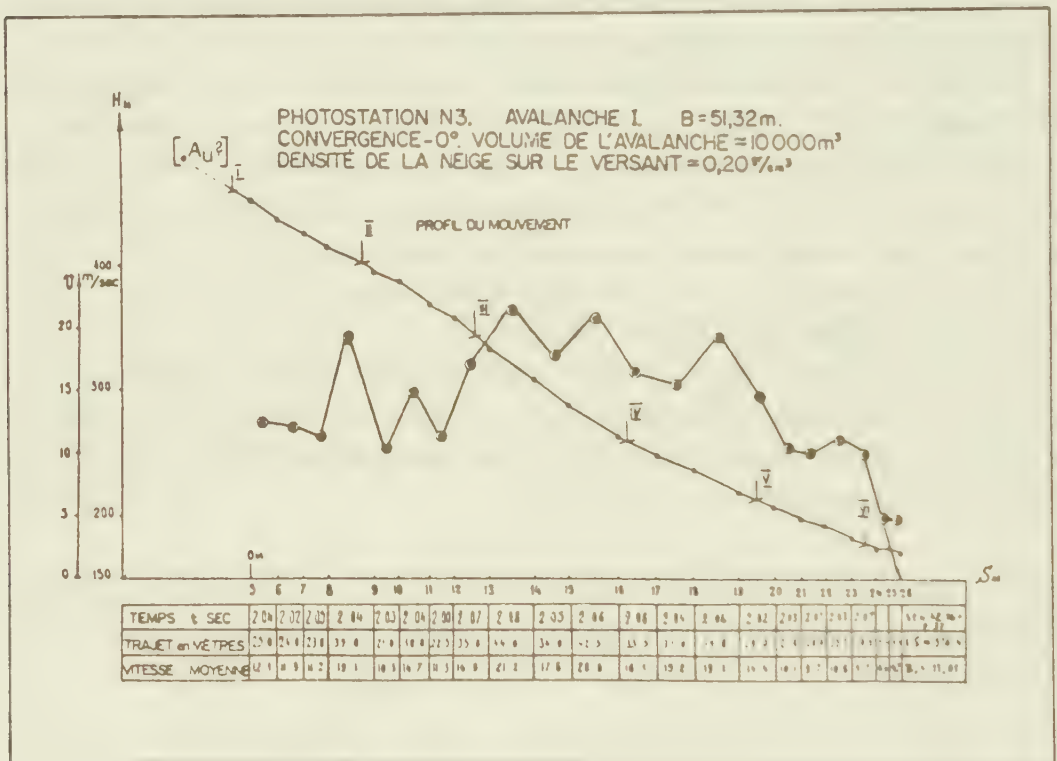
In den folgenden Abschnitten sollen an Hand eines Meßbeispiels aus der Literatur Wege aufgezeigt werden, wie man rechnerisch zu Geschwindigkeitsverlaufskurven kommt, die zum Entwickeln und Eichen theoretischer Bewegungsmodelle dienen können.

Alle folgenden Berechnungen beziehen sich auf die Lawinenfrontgeschwindigkeit. Die vorgestellten Rechenverfahren gelten aber ebenso für die Geschwindigkeit von Massenteilen im Inneren der Lawine.

4.2 Meßbeispiel aus der Literatur

Als Demonstrationsobjekt sei ein Lawinenereignis herausgestellt, das BRIUKHANOV (1966, Fig.4 und 1968, Tab.II A) veröffentlichte und das auch von KÖRNER (1980, Abb.9) als Rechenbeispiel verwendet wurde. Die Geschwindigkeitsmessung an der Trockenschneelawine erfolgte photogrammetrisch und erfaßte den Verlauf der Frontbewegung in Meßintervallen von rund 2 Sekunden (vgl. Abschn.3.2.4). Abbildung 27 gibt das Längsprofil der Lawinenbahn mit den Meßpunkten 5 bis 26 wieder. Die Originalzeichnung enthält nicht die untere Anrißkante A_u der gemessenen Lawine. Der Anrißpunkt A_u wurde deshalb geschätzt. In Abb. 27 sind

ferner die auf den einzelnen Abschnitten gemessenen mittleren Geschwindigkeiten in ein Geschwindigkeits-Horizontalweg-Diagramm als umrandete Punkte eingetragen. Diese Geschwindigkeitsverteilung zeigt starke Schwankungen. Ähnliche Schwankungen der Frontgeschwindigkeit beobachteten auch VAN WIJK (1967) und der Verfasser (vgl. Abschn.3.4.2). Solche Schwankungen können nicht immer mit örtlichen Geländeeigenschaften in Zusammenhang gebracht werden. Sie treten bisweilen auch auf glatten, gleichmäßig geneigten Hangstrecken auf. Wie schon in Abschnitt 2.3 erläutert, weist dieses Verhalten der Front darauf hin, daß Vorgänge im Inneren der Lawine die Frontgeschwindigkeitsschwankungen mit verursachen.



scheint es angebracht, den Modellrechnungen einen gemittelten Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront zugrunde zu legen.

Läßt man sich beim Mitteln der Lawinenfrontgeschwindigkeiten von der Frequenz der pulsierenden Geschwindigkeitsschwankungen leiten, und wählt man Bearbeitungsintervalle, die einem ganzzahligen Vielfachen der vermuteten Wellenlänge nahekommen, so repräsentiert in diesen Intervallen der mittlere Geschwindigkeitsverlauf der Front den Geschwindigkeitsverlauf der Lawine.

Um über die Frontdaten zum Geschwindigkeitsverlauf der Lawine zu kommen, ist es zunächst wichtig, die an der Front der gemessenen Lawine aufgetretenen Geschwindigkeitsschwankungen näher zu betrachten. Dazu verwenden wir nicht die in Abb.27 skizzierte Geschwindigkeits-Horizontaltweg-Darstellung. Aus den in Tab.8 zusammengestellten Lawinenbahn- und Frontlaufzeiten ermitteln wir das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm des gemessenen Lawinenereignisses. Dieses Diagramm ist in der Abb.28 (S.92) wiedergegeben.

AUFNAHMEMETHODE: LITERATUR-DATEN								
BEMERKUNGEN: (BRIUKHANOV 1968, TAB 11.A)								
(PHOTOGRAMMETR. GESCHW.-MESSUNG)								
PKT	SEG	LAENGE	WINKEL	DELT-H	DELT-L	H-(NN)	L-HORZ	ZEIT

4						481.9	54.0	0.00 (Au)?
	4	59.6	-33.0	-32.5	50.0	449.4	104.0	9.37
5	5	25.0	-34.9	-14.3	20.5	435.1	124.5	11.41
6	6	24.0	-28.9	-11.6	21.0	423.5	145.5	13.43
7	7	23.0	-32.3	-12.3	19.4	411.2	164.9	15.48
8	8	39.0	-27.5	-18.0	34.6	393.2	199.5	17.52
9	9	21.0	-23.6	-8.4	19.3	384.8	218.8	19.55
10	10	30.0	-35.0	-17.2	24.6	367.6	243.4	21.59
11	11	22.5	-31.9	-11.9	19.1	355.7	262.5	23.59
12	12	35.0	-38.7	-21.9	27.3	333.8	289.8	25.66
13	13	44.0	-36.7	-26.3	35.3	307.5	325.0	27.74
14	14	36.0	-35.7	-21.0	29.2	286.5	354.3	29.79
15	15	42.5	-31.0	-21.9	36.4	264.6	390.7	31.85
16	16	33.5	-28.5	-16.0	29.4	248.6	420.1	33.91
17	17	31.0	-22.6	-11.9	28.6	236.7	448.8	35.95
18	18	39.0	-29.7	-19.3	33.9	217.4	482.6	37.99
19	19	29.0	-22.7	-11.2	26.8	206.2	509.4	40.01
20	20	21.0	-23.3	-8.3	19.3	197.9	528.7	42.09
21	21	20.0	-17.2	-5.9	19.1	192.0	547.8	44.16
22	22	22.0	-26.2	-9.7	19.8	182.3	567.5	46.19
23	23	20.0	-19.6	-6.7	18.8	175.6	586.4	48.26
24	24	9.4	-11.0	-1.8	9.2	173.8	595.6	50.31
25	25	9.5	-14.0	-2.3	9.2	171.5	604.8	52.33
26								

Tab.8 Lawinenbahn- und Zeitdaten des Meßbeispiels aus Abb.27

Aus der Spalte 3 (=LAENGE) der Tabelle 8 entnehmen wir die Schrägentfernungen zwischen den Meßpunkten. Der Abstand zwischen den Punkten (PKT) 11 und 12 beträgt zum Beispiel 22.5 m. Die Lawinenfront legte diese Strecke nach den Daten der Spalte "Zeit" in 2 Sekunden zurück. Das entspricht auf dem Abschnitt einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 11.3 m/s. Diesen Wert kann man in Abb.28 auf der Ordinate über dem entsprechenden Abszissenabschnitt ablesen. Die einzelnen Meßzeitpunkte sind durch schwarze Dreiecksmarken über der Zeitachse gekennzeichnet.

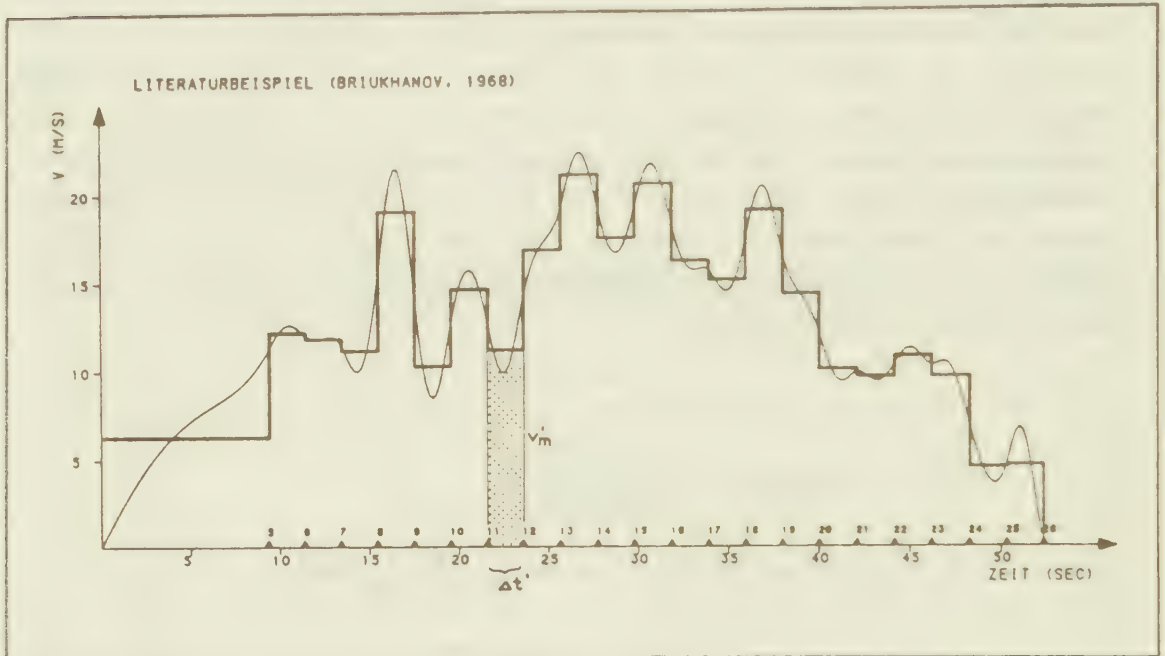


Abb.28 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm des Meßbeispiels aus Abb.27 mit eingepaßter stetiger Ausgleichsfunktion (vgl. Tab.8)

Betrachten wir in der Abb.28 die Stufenfunktion, so erkennen wir über den einzelnen Meßintervallen der Zeitachse rechteckige Integralflächen. Das Rechteck über einem Meßabschnitt hat die Breite $\Delta t'$ und als Höhe die gemessene mittlere Geschwindigkeit im Meßintervall v_m' . Die Rechtecksfläche beträgt also $\Delta t' \cdot v_m'$ und das ist nach Gleichung (32) die Länge der Meßstrecke auf dem Lawenstrich.

$$\Delta s = v_m' \cdot \Delta t' \quad (32)$$

Diese Gleichung ergibt sich, wenn die allgemeine Geschwindigkeitsformel $v_m = \Delta s / \Delta t$ nach Δs aufgelöst wird. Die in Abb.28 punktierte Fläche

zwischen Abszisse und Stufenfunktion verdeutlicht also einen von der Front zurückgelegten Weg von $11.3 \text{ m/s} \cdot 2 \text{ s} = 22.6 \text{ m}$.

Die gesamte Fläche zwischen der Zeitachse und der diskreten Treppenfunktion abschnittsweise gemittelter Geschwindigkeiten entspricht dem zurückgelegten Weg der Front vom Anrißpunkt A_u bis zum Endpunkt der Lawinenbewegung.

Die Treppenfunktion gibt den Geschwindigkeitsverlauf schematisiert wieder. In Wirklichkeit ist der Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront nicht stufig, sondern die Geschwindigkeiten gehen von Abschnitt zu Abschnitt fließend ineinander über. Die stetige, geschwungene Kurve in Abb.28 liefert eine Abschätzung, wie der Geschwindigkeitsverlauf an der Front ausgesehen haben könnte. Die Kurve ist eine sogenannte "Splinefunktion". Sie approximiert die Treppenfunktion flächentreu, das heißt, die Fläche unter der Splinekurve ist gleich der Fläche unter der Treppenfunktion. Auch über den einzelnen Meßintervallen sind die Integralflächen der Treppenfunktion und der Splinekurve gleich. Die Lawinenfront befand sich, wenn sie sich mit dem durch die Splinekurve angedeuteten Geschwindigkeitsverlauf bewegte, zu den einzelnen Meßzeitpunkten genau an den Geländeorten, an denen sie BRIUKHANOV (1968) beobachtet hat. Die mathematische Struktur der Splinefunktion wird in Abschnitt 4.3.2 etwas näher beleuchtet.

Die Splinefunktion liefert uns Informationen, die über die einzelnen abschnittsweise gemittelten Geschwindigkeiten hinaus gehen. Sie zeigt, daß auf einigen Meßstrecken die tatsächlichen Frontgeschwindigkeiten kurzzeitig deutlich über den abschnittsweise ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten gelegen haben mußten. Zum Beispiel hat BRIUKHANOV (1968) auf dem Lawenstrichabschnitt zwischen den Meßpunkten 8 und 9 eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 19.1 m/s gemessen. Die Splinekurve deutet in der Intervallmitte auf einen Geschwindigkeitswert von 21.5 m/s hin.

Betrachten wir den Verlauf der Frontgeschwindigkeit, so zeigt uns die Splinekurve, daß die realen Geschwindigkeitsschwankungen an der Front noch stärker sein mußten, als in den Meßdaten ohnehin schon zum Ausdruck kommt. Im folgenden wollen wir versuchen, diese starken Schwankungen rechnerisch auszugleichen.

4.3 Glättung schwankender Geschwindigkeitsverteilungen

4.3.1 Gleitende Mittel

In Abschnitt 3.4.2.9 wurde die Methode der gleitenden Mittelwertbildung bereits vorgestellt. Wenn wir das Verfahren auf den Geschwindigkeitsverlauf der Abb.28 anwenden und jeweils zwei benachbarte Meßstrecken zu einem Auswerteintervall zusammenfassen, so erhalten wir den gestrichelten Geschwindigkeitsverlauf in Abb.29. Die Sternchen markieren die berechneten Geschwindigkeiten in der Mitte der Auswerteintervalle. Da sich die Berechnungsintervalle beim gleitenden Mittel überschneiden, ist das Ergebnis keine Treppenfunktion mehr, sondern eine stetige Funktion. Allerdings weist die Kurve an den einzelnen Berechnungspunkten Knicke auf.



Abb.29 Gleitende Mittelwertbildung über je zwei Meßintervalle.
Geglätteter Frontgeschwindigkeitsverlauf: -----*-----
(vgl.Tab.8 und Abb.28)

Wie man rechnerisch zu der gestrichelten Kurve kommt, soll an einem Zahlenbeispiel verdeutlicht werden. Dazu betrachten wir in der Abb.29 den Abschnitt zwischen den Meßpunkten 8 und 11. Der gemessene Mittelwert der Frontgeschwindigkeit war zwischen den Punkten 8 und 9 sehr

hoch, fiel dann ab und stieg im letzten Drittel des ausgewählten Zeitabschnitts wieder an.

Zum Glätten des Geschwindigkeitsverlaufs fassen wir jeweils zwei Meßintervalle zusammen. Vom Punkt 8 bis zum Punkt 10 benötigte die Lawinenfront 4.07 Sekunden (vgl. Tab.8). Mit den Längenangaben der Tab.8 errechnen wir eine Durchschnittsgeschwindigkeit von

$$(39.0 \text{ m} + 21.0 \text{ m}) / 4.07 \text{ sec} = 14.7 \text{ m/s}.$$

Wir nehmen an, daß diese Geschwindigkeit in der Mitte des Intervalls, also am Punkt 9 geherrscht hat. Der errechnete Wert von 14.7 m/s ist in der Abb.29 über dem Punkt 9 durch ein Sternchen markiert.

Das nächste Berechnungsintervall reicht vom Punkt 9 bis zum Punkt 11. Es überlappt den vorausgegangenen Rechenabschnitt. Mit den Daten der Tab.8 ermitteln wir für das Intervall [9,11] eine durchschnittliche Frontgeschwindigkeit von 12.5 m/s. Dieser Wert wird dem Punkt 10 zugeordnet.

Der Abschnitt zwischen den Punkten 9 und 10 gehört beiden genannten Berechnungsintervallen an. Die gleitend gemittelte Geschwindigkeit der Front beim Durchlaufen dieses Intervalls muß also zwischen 14.7 m/s und 12.5 m/s liegen. Wir nehmen an, daß der Geschwindigkeitsabfall vom Punkt 9 zum Punkt 10 linear verläuft (vgl. Abb.29). Da das Meßintervall [9,10] eine Zeitspanne von 2.03 Sekunden umfaßt, errechnet man eine durchschnittliche Verzögerung b von

$$b = \Delta v / \Delta t = (12.5 \text{ m/s} - 14.7 \text{ m/s}) / 2.03 \text{ sec} = - 1.1 \text{ m/s}^2.$$

Für den nächsten Meßabschnitt, zwischen den Punkten 10 und 11 liefert die gleitende Mittelwertberechnung eine durchschnittliche Beschleunigung von 0.25 m/s^2 . Der Übergang von der verzögerten Bewegung in die Beschleunigung erfolgt nach dieser Berechnungsmethode abrupt am Punkt 10. Für verschiedene Anwendungen wäre eine stetige Änderung der Beschleunigungswerte jedoch günstiger. Das folgende Glätteverfahren liefert diese stetigen Übergänge.

4.3.2 Splineapproximation

Ähnlich wie beim Verfahren der gleitenden Mittelwertbildung, geht man auch bei dieser Methode zu größeren Auswerteintervallen über. Allerdings überlappen sich die Intervalle nicht. Sie schließen fortlaufend aneinander an.

Wieviele der ursprünglichen Meßintervalle jeweils zu einem größeren Berechnungsabschnitt zusammengefaßt werden, hängt von der Bewegungsdynamik der beobachteten Lawine ab. Die einzelnen Abschnitte sollten so weit gefaßt werden, daß sie bei rhythmisch pulsierenden Frontbewegungen

die durchschnittliche Zeitspanne zwischen den Geschwindigkeitsspitzen umfassen. In BRIUKHANOVs (1968) Meßbeispiel treten die Geschwindigkeitsspitzen alle 4 bis 6 Sekunden auf (vgl. Abb. 28). Diese Zeitspanne nehmen wir als Grundlage unserer Berechnung.

Das Verfahren sieht zunächst vor, aus den Meßdaten für die vergrößerten Intervalle die mittleren Geschwindigkeiten zu errechnen und diese Werte als Treppenfunktion aufzuzeichnen. Anschließend wird die so ermittelte Treppenfunktion in eine stetige, knickfreie Kurve übergeführt. Dabei muß die Integralfläche unter der Kurve mit der Integralfläche der Treppenfunktion übereinstimmen, da diese Fläche den von der Lawine zurückgelegten Weg repräsentiert. Diese Aufgabe ist, wie auf Seite 93 bereits angedeutet, mit Hilfe einer Splinefunktion zu lösen.

Splinefunktionen sind zusammengesetzte Funktionen. Sie bestehen aus Teilfunktionen, die innerhalb vorgegebener Abschnitte gelten und an den Abschnittsgrenzen fließend in die benachbarten Teilfunktionen übergehen. Die mathematische Verknüpfung der Teilfunktionen soll kurz beschrieben werden:

Seien $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ Abschnittsgrenzen auf der Zeitachse, dann können wir $n-1$ Intervalle $[t_k, t_{k+1}] = \Delta t_k$ ausscheiden. In jedem dieser Intervalle hatte die Lawinenfront eine bestimmte Durchschnittsgeschwindigkeit v_{km} ($k=1, \dots, n-1$), die durch die Treppenhöhe in diesem Bereich graphisch wiedergegeben ist. Bei der Splineapproximation ordnen wir nun jedem Intervall eine Funktion der Form

$$f_k(t) = a_k(t-t_k)^4 + b_k(t-t_k)^3 + c_k(t-t_k)^2 + d_k(t-t_k) + e_k \quad (33)$$

zu. Darin sind die 5 Koeffizienten a_k bis e_k unbekannt. Insgesamt hat man bei $n-1$ Teilfunktionen also $5 \cdot (n-1)$ Unbekannte zu errechnen. Dazu ist ein Gleichungssystem mit ebensovielen Gleichungen notwendig. Die Gleichungen erhalten wir über folgende Überlegungen und Annahmen:

- 1) Die Teilfunktionen müssen an den Abschnittsgrenzen ineinander übergehen. Es gilt

$$f_{k-1}(t_k) = f_k(t_k) \quad k = 2, \dots, n-1 \quad (34)$$

- 2) Die Geschwindigkeiten $v_{k/k+1}$ an den Schnittstellen sollen zwischen den Durchschnittsgeschwindigkeiten auf den benachbarten Teilstrecken liegen. Wir wählten als Berechnungsformel

$$v_{k/k+1} = (\Delta t_{k+1} \cdot v_{km} + \Delta t_k \cdot v_{k+1m}) / (\Delta t_k + \Delta t_{k+1})$$

Damit werden die Abschnittsgeschwindigkeiten mit dem Kehrwert der Intervalllänge gewichtet. Das führt dazu, daß beim Übergang von einem breiten zu einem schmalen Meßintervall der Geschwindigkeits-

wert $v_{k/k+1}$ stärker durch die Geschwindigkeit der kürzeren Meßstrecke bestimmt wird. Als Bestimmungsgleichungen erhalten wir

$$f_k(t_{k+1}) = v_{k/k+1} \quad k = 1, \dots, n-2 \quad (35)$$

- 3) Weil die Teilfunktionen an den Intervallgrenzen mit gleicher Steigung aneinander anschließen sollen, müssen die 1. Ableitungen der benachbarten Funktionen an den Schnittstellen gleich sein.

$$f'_{k-1}(t_k) = f'_k(t_k) \quad k = 2, \dots, n-1 \quad (36)$$

- 4) Auch die Kurvenkrümmung darf sich beim Übergang nicht ändern. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die 2. Ableitungen gleich sind.

$$f''_{k-1}(t_k) = f''_k(t_k) \quad k = 2, \dots, n-1 \quad (37)$$

- 5) Die zusätzlich geforderte flächentreue Umwandlung der Treppenfunktion führt zu den Gleichungen

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} f_k(t) dt = v_{km} \cdot (t_{k+1} - t_k) = v_{km} \cdot \Delta t_k \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (38)$$

Im mathematischen Anwendungsbereich werden überwiegend Splines dritten Grades eingesetzt. Durch die unter 5) aufgeführte Integralfestlegung wären kubische Splines aber überbestimmt. Das führt zu Mehrfachlösungen (SPÄTH 1968). Deshalb verwenden wir Splinefunktionen 4. Grades (Gl.33). Damit ergeben sich eindeutige Lösungen.

Da die Gesamtzahl der unter (34) bis (38) aufgeführten Gleichungen nur $4(n-2)+(n-1) = 5n-9$ ausmacht, wir aber zur Lösung des Problems $5n-5$ Bestimmungsgleichungen benötigen, müssen noch Randbedingungen vorgegeben werden. Das sind zum einen die Funktionswerte zu den Zeitpunkten t_1 und t_n , also am Anfang und am Ende der Bewegung. Sie sind gleich Null, da die Frontgeschwindigkeit in diesen Punkten 0 m/s beträgt. Als weitere Bestimmungsgleichungen geben wir die Steigungen der Splinefunktion am Anfangs- und Endpunkt der Berechnung an. Alle im Abschnitt 4 berechneten Splinefunktionen erhielten einen Anfangssteigungswert von 2.0 und im Punkt 26 eine Endsteigung von -4.0. Die Steigung der Splinekurve in einem Kurvenpunkt ist im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm der Differentialquotient $\Delta v / \Delta t$. Das entspricht physikalisch der Beschleunigung. Mit der Wahl der Randsteigungen nehmen wir also an, daß die Lawine anfangs mit 2 m/s² beschleunigte und in der Endphase der Bewegung eine Verzögerung von -4 m/s² aufwies. Die Beschleunigungswerte wurden aus den Weg- und Zeitwerten der Tab.8 überschlägig abgeschätzt. Ihre Genauigkeit beeinflußt das Approximationsverfahren unwesentlich.

Eine Zusammenstellung der mathematischen Grundlagen zur Erstellung und Anwendung von Splinefunktionen findet man bei SPÄTH (1978). Dort sind auch Algorithmen zur Lösung der umfangreichen Gleichungssysteme angegeben.

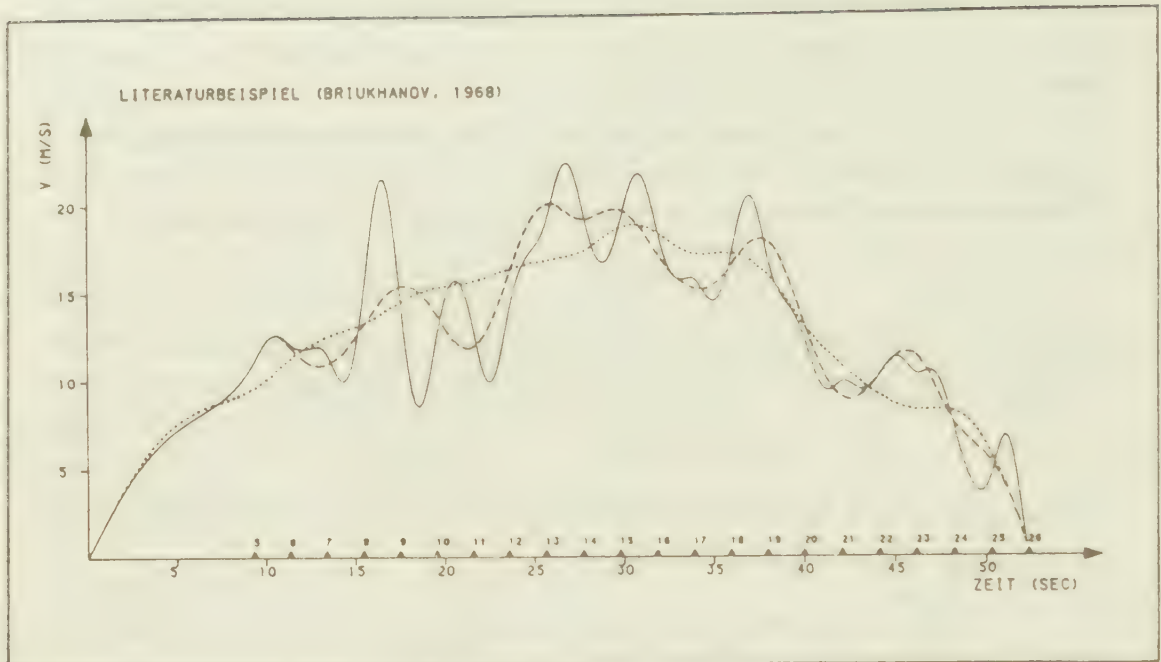


Abb.30 Glättende Splinefunktion im Vergleich mit der Splinekurve des gemessenen Frontgeschwindigkeitsverlaufs (vgl. Abb.28)

—————	gemessen (Zeitintervall: 2 sec)
-----	geglättet (Zeitintervall: 4 sec)
.....	geglättet (Zeitintervall: 6 sec)

Fassen wir in unserem Meßbeispiel je zwei Meßintervalle zu einer neuen Auswerteeinheit zusammen, so liefert uns die Splineumformung die gestrichelte Kurve in Abb.30. Geht man von einer periodischen Bewegung im 6-Sekunden-Rhythmus aus und werden deshalb je 3 Meßintervalle zusammengefaßt, so erhält man in Abb.30 die punktierte Splinekurve.

Welcher Grad der Glättung zu bevorzugen ist, hängt von der vermuteten Wellenlänge und damit von der Periodendauer der zugrundeliegenden Schwingung ab. Im vorliegenden Beispiel darf man annehmen, daß die Periodendauer etwa bei 5 Sekunden lag; Die gestrichelte Kurve also noch zu sehr von den Geschwindigkeitsschwankungen der Lawinenfront geprägt, während die punktierte Linie mitunter zu stark geglättet ist. Jener mittlere Verlauf der Frontgeschwindigkeit, der dem Verlauf der Lawinengeschwindigkeit nahekommt, dürfte zwischen der gestrichelten und punktierten Kurve liegen. Wir erhalten diese gedanklich dazwischenliegende Linie, wenn wir über den einzelnen Abszissenpunkten die Funktionswerte beider Glättungskurven mitteln. Der so errechnete, vermutete Verlauf der Lawinengeschwindigkeit ist in Abb.31 (S.99) gestrichelt eingezeichnet

4.4 Umwandlung abschnittsweise gemittelter Geschwindigkeiten in stetige Geschwindigkeitsverteilungen

Den folgenden Ausführungen liegt ebenfalls die oben skizzierte Methode der Splineapproximation zugrunde. Allerdings benützt man die Splinekurve jetzt nicht zum Glätten, sondern zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsverlaufs an Hand einiger weniger Meßdaten.

Nehmen wir an, die "BRIUKHANOV-Lawine" sei nicht detailliert photographisch gemessen, sondern man habe wenige Frontlaufzeiten mit der Stoppuhr ermittelt. Neben der Gesamtlaufzeit, lägen nur die Laufzeiten bis zu den Bahnpunkten 12 und 19 vor. Die Lawinenfront soll den Bahnpunkt 12 nach 23.59 Sekunden und den Punkt 19 nach 37.99 Sekunden durchlaufen haben. Die Gesamtlaufzeit betrage 52.33 Sekunden (vgl. Tab.8).

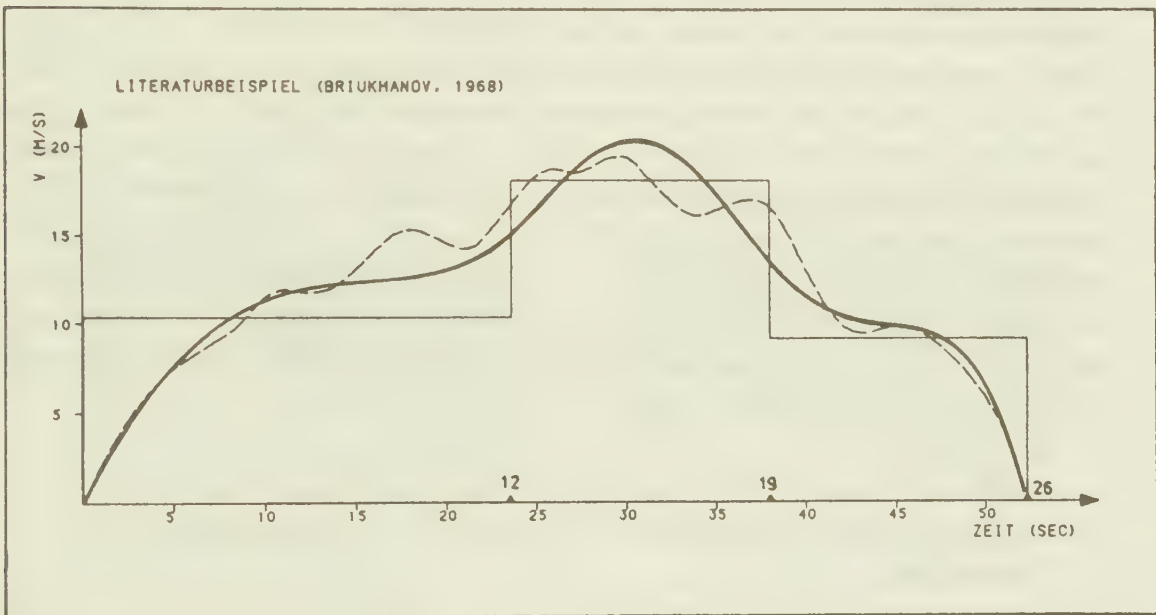


Abb.31 Aus 3 Laufzeiten abgeschätzter Geschwindigkeitsverlauf (—) im Vergleich mit dem detailliert abgeschätzten Verlauf der Lawinengeschwindigkeit (-----)

Mit diesen Zeitangaben und den Meßstreckenlängen der Tab.8 errechnen wir für die Strecke vom Anrißpunkt A_u bis zum Punkt 12 eine mittlere Frontgeschwindigkeit von 10.3 m/s, zwischen den Punkten 12 und 19 18.1 m/s und für das dritte Meßintervall 9.1 m/s. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten führen zur Treppenfunktion der Abb.31. Mit Hilfe des

Rechenalgorithmus von SPÄTH (1978, S.61) berechnet man dann, ausgehend von der Treppenfunktion in Abb.31 Teilfunktionen für die drei Meßintervalle auf der Abszisse. Vom Koordinatenursprung bis zur 1. Intervallgrenze (Punkt 12) lautet die Splinefunktion

$$v = 5.77 \cdot 10^{-5} \cdot t^4 + 1.737 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 0.0937 \cdot t^2 + 2.0 \cdot t \quad (39)$$

Setzt man in diese Teilfunktion beispielweise den Zeitwert $t = 23.0$ ein, so erhält man eine Geschwindigkeit von $v = 14.68$ m/s. Das ist die errechnete Lawinengeschwindigkeit, kurz vor dem Eintreffen der Lawinenfront am 1. Meßpunkt.

Die vollständige Splinekurve ist in der Abb.31 dick ausgezogen gezeichnet. Ein Vergleich dieser Geschwindigkeitsverteilung mit dem gestrichelt eingetragenen, vermuteten Geschwindigkeitsverlauf der Lawine verdeutlicht die Ähnlichkeit beider Kurven. Mit Hilfe dreier Frontlaufzeitmessungen auf großen Bahnabschnitten ist es also möglich, den Geschwindigkeitsverlauf einer Lawine annähernd abzuschätzen.

Das Auswerteverfahren liefert keine befriedigenden Ergebnisse, wenn starke Änderungen des Bahnwiderstandes zu einem abrupten Abbremsen oder zum plötzlichen Beschleunigen der Lawine führen. Ändert sich der Widerstand auf der Bahn nicht oder nur geringfügig, so bezeichnen wir den Lawenstrich mit LAATSCH u.a. (1981) als stetig. Auf stetigen Lawenestrichen liefert die skizzierte Splinefunktionsberechnung im allgemeinen gute Ergebnisse. Stetige Lawenestriche erlauben auch grobe Abschätzungen des Geschwindigkeitsverlaufs aus Pauschallaufzeiten. Das soll der folgende Abschnitt zeigen.

4.5 Abschätzen der Geschwindigkeitsverteilung aus Gesamtlaufzeitmessungen

Um die Auswertemethode verstehen zu können, müssen wir kurz auf die Energieumwandlung beim Lawinenereignis eingehen. Ausführlich erörtert LAATSCH (1977 u. 1978) das Modell der Energieumformung.

Bei jeder Lawinenbewegung wird potentielle Energie, also Energie der Lage in kinetische Energie und Widerstandsarbeit umgewandelt. Am Anfang der Bewegung besitzt die Lawine nur potentielle Energie. Am Schluß sind

sowohl potentielle als auch kinetische Energie verbraucht. Mit der Abnahme der Höhenlage der Lawine entsteht auf Kosten der potentiellen Energie Bewegungsenergie und Widerstandsarbeit. Für jeden Punkt der Bahn gilt die Gleichung

Gesamtenergie = pot. Energie + kinet. Energie + Widerstandsarbeit

Diese Zusammenhänge lassen sich in Profildiagrammen veranschaulichen, wenn man die Energiebeträge auf 1 kg Lawinengewicht bezieht. Man erhält spezifische Energiebeträge. Sie haben die Dimension "Meter" und damit die Bedeutung von Höhen.

$$\frac{E_{\text{pot}}}{m \cdot g} = \frac{m \cdot g \cdot h_{\text{pot}}}{m \cdot g} = h_{\text{pot}} \quad (40)$$

$$\frac{E_{\text{kin}}}{m \cdot g} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{m \cdot g} = \frac{v^2}{2g} = h_{\text{kin}} \quad (41)$$

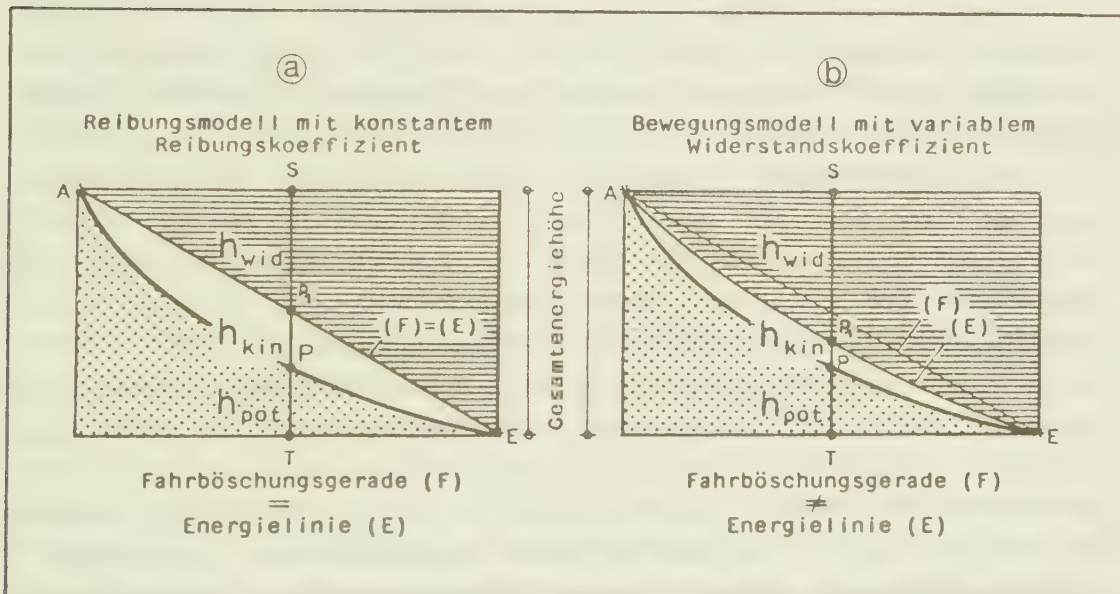


Abb.32 Schema der Energieumformung im Reibungsmodell mit konstantem Reibungswiderstand und im Bewegungsmodell mit variablem Bewegungswiderstand

In den beiden Diagrammen der Abb.32 sind die potentielle Energiehöhe (h_{pot}), die kinetische Energiehöhe (h_{kin}) und die Widerstandsenergiehöhe (h_{wid}) am Bahnpunkt P übereinander dargestellt. Es handelt sich um die Strecken TP, PP₁, und P₁S.

Abbildung 32a stellt das sogenannte Reibungsmodell dar. Nach LAATSCH (1977) gilt es für langsame Lawinen, deren Geschwindigkeiten nicht über

10-13 m/s hinausgehen. Ihre Bewegung läßt sich durch die bekannte Gleitreibungsformel mit konstantem Reibungskoeffizienten beschreiben. Die Abb.32b skizziert die Energieumwandlung für die Bewegung schneller Lawinen. Dabei ist in der Bewegungsgleichung der konstante Reibungskoeffizient durch einen variablen Widerstandskoeffizienten ersetzt.

Die punktierten Flächen beider Diagramme stellen den Längsschnitt durch den Hang unter der gekrümmt gezeichneten Lawinenbahn dar. Der Anfangspunkt A und der Endpunkt E der Lawinenbewegung sind in beiden Diagrammen durch eine Gerade, die sogenannte Fahrböschungsgerade, verbunden. Nur im Reibungsmodell (Abb.32a) hat diese Gerade die Bedeutung einer Energielinie, genauer müßte man sagen: einer Energiehöhenlinie; denn für jeden Punkt der Bahn trennt sie die für weitere Bewegung verfügbaren Energiehöhen h_{pot} und k_{kin} vom Energieverlust h_{wid} (=Widerstandshöhe) ab.

Der Bewegung schneller Lawinen entspricht das Schema der Abb.32b. Im Bewegungsmodell mit variablem Widerstandskoeffizient ist die Energielinie E keine Gerade. KÖRNER (1976) und LAATSCH (1978) nehmen an, daß bei schnellen Lawinen die Energielinie unter der Fahrböschungsgeraden durchhängt, weil Turbulenz zunächst den Bewegungswiderstand erhöht. Damit geht am Oberhang, im Vergleich zum Reibungsmodell, ein größerer Teil der Gesamtenergie in Form von Widerstandsarbeit der Lawinenbewegung verloren. Über dem unteren Teil der Lawinenbahn der Abb.32b wird der Abstand zwischen Energielinie E und Fahrböschungsgerade F wieder kleiner, so daß am Ende der Bahn - genau wie in Abb.32a - alle bewegungsfördernde Energie in Widerstandsarbeit umgewandelt ist.

Die Figuren 32a und 32b sind nicht maßstabsgerecht gezeichnet. Schnelle Lawinen mit ausgeprägten Turbulenzercheinungen haben große Fallhöhen. Die rechte Figur müßte deshalb wesentlich größer als die linke gezeichnet werden. Berücksichtigt man den schematischen Charakter der Abb.32 nicht, so käme man bei einem Vergleich ihrer Dimensionen zu dem widersinnigen Ergebnis, daß beim Reibungsmodell der langsamen Bewegung (Abb.32a) weit größere Energiehöhen und damit auch Geschwindigkeiten erreicht werden als im Fall der Abb.32b.

Zum Erläutern der folgenden Überlegungen dient uns ausschließlich Abb.32b. Da in sie die Fahrböschungsgerade F eingezeichnet ist, können wir für jeden Bahnpunkt 2 verschiedene kinetische Energiehöhen unterscheiden. Die eine ist die tatsächliche Höhe. Im Bahnpunkt P reicht sie bis P_1 hinauf. Wir wollen sie, wie auf S.84, als Geschwindigkeitshöhe bezeichnen. Die andere ist die dem Reibungsmodell entsprechende, bis zur Fahrböschungsgeraden hinaufreichende kinetische Energiehöhe $h_{\text{kin}}(r)$.

Zum Auswerten der Gesamtlaufzeitmessungen schneller Lawinen nehmen wir an, daß auf stetigen Lawinenbahnen das Verhältnis beider Höhen in jedem Bahnpunkt gleich sei. Damit lautet unsere Hypothese für alle Bahnpunkte P_i :

$$\frac{h_v}{h_{kin}(r)} = \text{konstant} \quad (42)$$

Die konstante Verhältniszahl bezeichnen LAATSCH u.a. (1981) als Höhenquotient. Wir geben diesem Quotienten die Benennung HQ. Mithin lautet die nach h_v aufgelöste Gleichung (42)

$$h_v = HQ \cdot h_{kin}(r) \quad (43)$$

Der Höhenquotient dient uns als Hilfsgröße beim Abschätzen des Geschwindigkeitsverlaufs einer Lawine, von der wir außer ihrer Bahn nur die Gesamtlaufzeit kennen. Aufgabe des Auswerteverfahrens ist es, HQ so zu bestimmen, daß man mit der Gleichung (43) für jeden Bahnpunkt eine Geschwindigkeitshöhe und damit einen Geschwindigkeitsverlauf auf der Bahn erhält, der genau zum gemessenen Zeitpunkt zum Stillstand der Lawine führt.

Um zum gesuchten Ergebnis zu kommen, unterteilt man die Lawinenbahn in viele Rechenabschnitte von zum Beispiel 2 m Länge. In der Mitte jeden Intervalls mißt oder berechnet man den Abstand zwischen Bahnpunkt und Fahrböschungsgerade. Das ist die kinetische Energiehöhe $h_{kin}(r)$.

Die Auswertemethode ist ein Iterationsverfahren, das gegebenenfalls mehrere, sich wiederholende Rechengänge braucht. Für den 1. Iterationsschritt nehmen wir an, daß HQ gleich 1 sei. Die tatsächlichen Geschwindigkeitshöhen h_v in den einzelnen Bahnpunkten wären dann gleich dem $h_{kin}(r)$ -Wert und die Energielinie wäre mit der Fahrböschungsgerechten identisch.

Aus jeder für die einzelnen Bahnintervalle gefundenen Geschwindigkeitshöhe h_v berechnet man die Geschwindigkeit. Wir nehmen an, daß diese die mittlere Geschwindigkeit v_m auf dem 2 m langen Bahnabschnitt Δs sei. Mit der Formel

$$\Delta t = \Delta s / v_m \quad (44)$$

ermittelt man die Zeit Δt , welche die Lawine brauchte, um den 2 m-Abschnitt zu durchlaufen.

Entlang der Lawinenbahn summieren wir die einzelnen, berechneten Zeiten auf und vergleichen den Endwert mit der tatsächlich gemessenen Gesamtlaufzeit. Stimmen errechnete und gemessene Gesamtlaufzeit nicht überein, so bilden wir den Quotient aus errechneter und gemessener Zeit und multiplizieren den Höhenquotienten HQ mit diesem Wert. Mit der Gleichung (43) werden dann erneut die Geschwindigkeitshöhen in den Rechenintervallen bestimmt. Der oben angegebene Rechengang führt zu einer

neuen errechneten Endzeit, die gegebenenfalls zu einer weiteren Korrektur von HQ führt. Das Iterationsverfahren wird fortgesetzt, bis die gemessene und errechnete Gesamtlaufzeit übereinstimmen.

In dem Lawinenbeispiel der Tab.8 betrug die Gesamtlaufzeit 52.3 Sekunden. Führen wir das Iterationsverfahren wie angegeben durch, so errechnen wir einen Höhenquotienten $HQ = 0.92$. Mit diesem Höhenquotienten erhält man die durchgezogene Geschwindigkeitsverteilung in Abb.33.

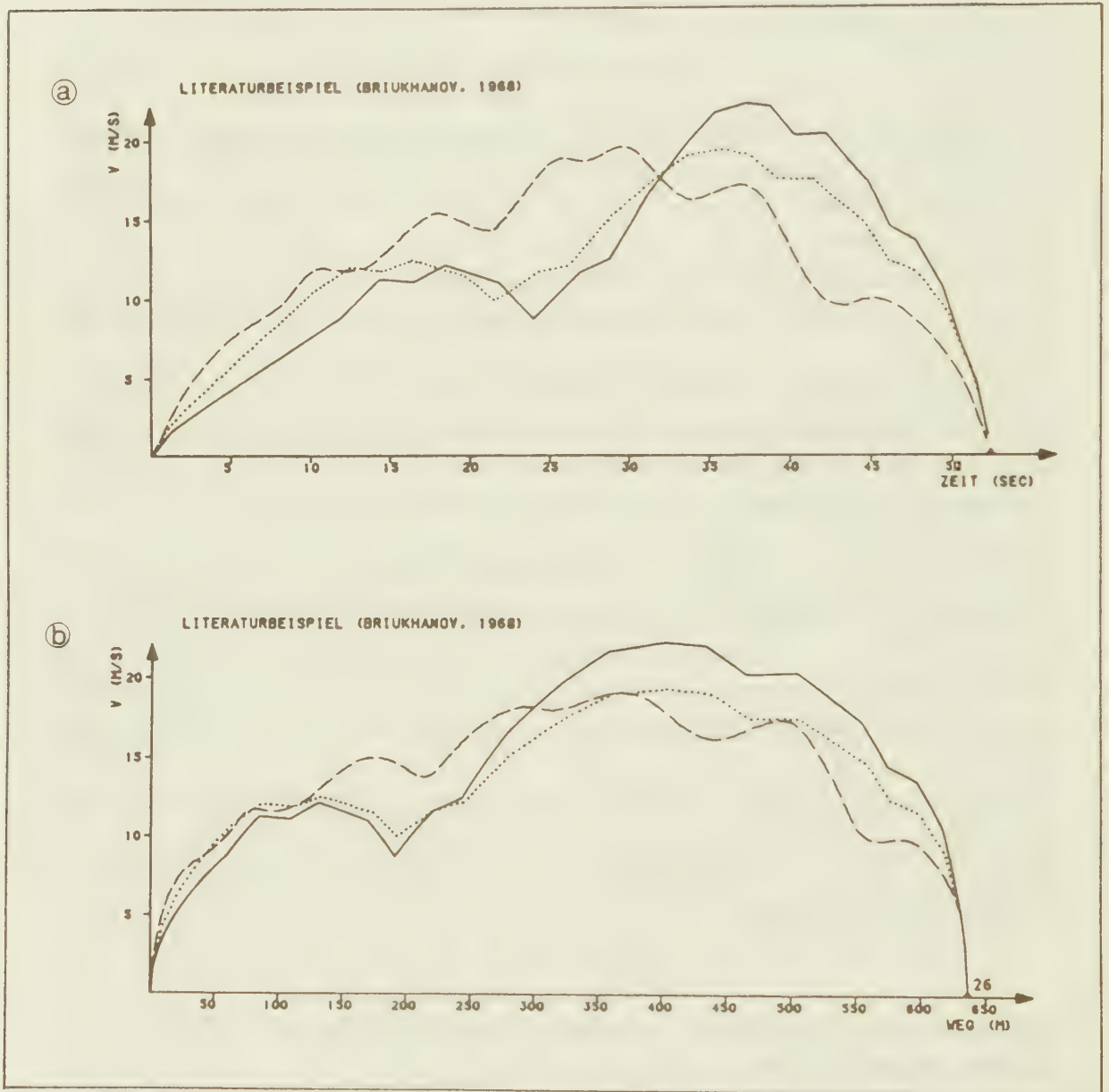


Abb.33 Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung des iterativen Höhenquotientenverfahren (—) mit dem vermuteten Lawinengeschwindigkeitsverlauf (-----) im Geschwindigkeits-Zeit- und im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm (..... Kurve bei 5 m höher liegendem Anrißpunkt A_U)

In die Geschwindigkeit-Zeit- und Geschwindigkeit-Weg-Diagramme der Abb.33 wurde der aus den detaillierten Messungen abgeleitete Geschwindigkeitsverlauf der Lawine gestrichelt eingezeichnet (vgl. Abb.30 und 31 auf S.98 und 99)

Die punktierte Kurve ergibt sich aus der Iteration, wenn man annimmt, daß die erste Teilstrecke nicht 33° sondern 37° geneigt sei. Dann kommt der vermutete Anrißpunkt A_u etwas höher zu liegen (487.0 m NN statt 481.9 m NN, vgl. Tab.8). Die Fahrböschungsgerade wird geringfügig steiler und wir erhalten durch die iterative Auswertung der Gesamtlaufzeit eine Geschwindigkeitsverteilung, die dem detailliert errechneten Geschwindigkeitsverlauf der Lawine durchaus ähnlich ist.

Um das Höhenquotientenverfahren zu überprüfen, sind weitere Vergleiche zwischen detaillierten Messungen und Pauschallaufzeitauswertungen notwendig. Dazu fehlt bislang ausreichendes Datenmaterial. Es scheint jedoch auf stetigen Lawinenstrichen möglich zu sein, mit Hilfe des Höhenquotienten den Geschwindigkeitsverlauf der Lawine auf der Bahn grob abzuschätzen.

In dem Meßbeispiel führt die Gesamtlaufzeit von 52.3 Sekunden zu einer Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Bahn von rund 12 m/s. Darüber hinaus deutet das Iterationsverfahren darauf hin, daß vermutlich rund 400 m talwärts des Anrisses eine maximale Lawinengeschwindigkeit von etwa 20 m/s erreicht wurde.

4.6 Abschätzen natürlicher Schwankungsbreiten der gemessenen Geschwindigkeiten

Im Abschnitt 4.3 haben wir gesehen, wie man pulsierende Frontgeschwindigkeitsverteilungen glätten kann. Man erhält einen mittleren Geschwindigkeitsverlauf der Front von dem wir annehmen, daß er dem Verlauf der Lawinengeschwindigkeit gleich sei. Der Geschwindigkeitsverlauf der Lawine läßt sich nach den Ausführungen in Abschnitt 4.4 und 4.5 auch aus relativ einfachen Geländemeßdaten annähernd abschätzen.

Für die Interpretation von Meßdaten ist es wichtig zu wissen, wie weit die variierende Geschwindigkeit der Front oder auch einzelner Massenteile an bestimmten Bahnpunkten vom mittleren Frontgeschwindigkeitsverlauf - also von der vermutlichen Lawinengeschwindigkeit - abweichen können.

Wir wollen dies zunächst an BRIUKHANOVs Meßbeispiel überprüfen. Da die Meßintervalle bei BRIUKHANOV (1968) klein sind, kann man den Vergleich zwischen gemessener und gemittelter Geschwindigkeit nicht nur für einzelne Bahnpunkte sondern auch für einzelne Zeitpunkte durchführen. Die Daten sind dann den Geschwindigkeit-Zeitdiagrammen in Abb.28

und 31 zu entnehmen. Aus dem approximierten Kurvenverlauf der Abb.28 (S.92) erhalten wir zu einzelnen Zeitpunkten die Frontgeschwindigkeit. Die gestrichelte Kurve in Abb.31 auf Seite 99 liefert über den entsprechenden Punkten der Zeitachse die zugehörige vermutete Lawinengeschwindigkeit. Eine Gegenüberstellung der Werte zeigt die Tabelle 9.

Zeitpunkt (sec)	V(Front) (m/s)	V(Lawine) (m/s)	$\frac{V(\text{Front})}{V(\text{Lawine})}$
10.6	12.7	11.7	1.09
14.4	10.0	12.3	0.81
16.4	21.5	14.2	1.51
18.6	8.5	15.0	0.57
20.6	15.7	13.9	1.13
22.4	9.9	14.4	0.69
51.0	6.7	4.2	1.60

Tab.9 Vergleich der gemessenen Frontgeschwindigkeiten (vgl. Abb.28) mit den vermuteten Lawinengeschwindigkeiten (vgl. Abb.31) zu gleichen Zeitpunkten.

Die Verhältniszahlen "Frontgeschwindigkeit/Lawinengeschwindigkeit" reichen von 0.57 bis 1.60. Das heißt, in dem Meßbeispiel liegt die Frontgeschwindigkeit zu einzelnen Zeitpunkten bis zu 43 % unter der ermittelten Lawinengeschwindigkeit. An anderer Stelle übersteigt sie die Lawinengeschwindigkeit um 60 %.

Für die Abweichungen nach unten liegen keine weiteren Vergleichszahlen vor. Wenn wir annehmen, daß die von BRIUKHANOV gefundenen Geschwindigkeitsschwankungen an der Lawinenfront ein Ergebnis von Geschwindigkeitsvariationen im Lawineninnern sind, so können wir die Zahlen der Tabelle 9 mit den Ergebnissen von EYBERT - BERARD u.a. (1978) vergleichen ^{*}): Die französischen Wissenschaftler hatten an bestimmten Bahnpunkten mit Flügelrädern die Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren von Lawinen gemessen. Insgesamt liegen Daten von 25 Lawinen vor. Im Schnitt beträgt die Verhältniszahl "Maximalgeschwindigkeit/mittlere Geschwindigkeit" am Standort des Meßgerätes 1.8. Die Strömungsgeschwin-

^{*}) Mein Dank gilt Herrn Ing.Dr. G. Brugnot für die Übersendung des Datenmaterials.

digkeiten können an einzelnen Stellen im Inneren der Lawine also um rund 80 % über der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit liegen.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen SHIMIZU u.a.(1974), EYBERT-BERARD u.a. (1978), KOTLYAKOV u.a. (1980) und SCHAERER u. SALWAY (1980) durch Druckmessungen an Trockenschneelawinen (vgl. S.49 unten). Man darf deshalb wohl annehmen, daß in Trockenschneelawinen die Spitzengeschwindigkeiten einzelner Massenteile 50 bis 80 % über der mittleren Teilchengeschwindigkeit, also über der Lawinengeschwindigkeit liegen können.

Wenn wir an Trockenschneelawinen auf sehr kurzen Strecken die Frontgeschwindigkeit oder die Geschwindigkeit einzelner Massenteile im Inneren der Lawine messen, müssen wir also damit rechnen, Werte zu erhalten, die mitunter bis zu 80 % über der tatsächlichen Lawinengeschwindigkeit liegen. Gegebenenfalls können die gemessenen Geschwindigkeiten aber auch deutlich unter der tatsächlichen Lawinengeschwindigkeit liegen.

Feucht- und Naßschneelawinen weisen im Inneren und an der Front geringe Geschwindigkeitsvariationen auf. Die Relation "Frontgeschwindigkeit/Lawinengeschwindigkeit" dürfte deshalb annähernd 1 sein. Allerdings fehlen bislang Geschwindigkeitsmessungen an Naß- und Feuchtschneelawinen, um diese Annahme zu überprüfen.

5 Ausblick

In den vorausgegangenen Abschnitten haben wir gesehen, wie man im Gelände Daten zum Ermitteln der Lawinengeschwindigkeiten gewinnen kann, und wie man diese Daten gegebenenfalls rechnerisch und graphisch aufbereitet. Abschließend soll kurz auf die weitere Verwendung von Geschwindigkeitsdaten eingegangen werden.

Dem Lawinenverbauer und dem Praktiker, der Gefahrenzonenpläne erstellen muß, werden Geschwindigkeitsmeßdaten direkt wenig nützen. Er muß sich an extremen Lawinenereignissen orientieren, deren Geschwindigkeiten kaum meßbar sind. Auch die Planung von Ablenkdämmen, Bremskegeln oder sonstigen Schutzbauwerken im Lawinenstrich muß im allgemeinen von seltenen Großlawinen ausgehen und kann deshalb nicht direkt auf Meßdaten zurückgreifen.

Es sind jedoch Fälle denkbar, in denen Geschwindigkeitsmessungen sofort planerisch verwendbar sind. Nehmen wir beispielsweise an, auf einem Lawinenstrich über einer Straße werden regelmäßig nach starken Schneefällen Lawinensprengungen durchgeführt, um den Verkehr zu sichern. Die abgesprengten Lawinen verschütten aber häufig die Straße und erfordern zusätzliche Räummaßnahmen. In diesem Fall könnte man sich überlegen, ob es eine kostengünstige Möglichkeit gibt, die künstlich ausgelösten Lawinen vor dem Erreichen der Straße aufzuhalten. Mit Hilfe von Laufzeitmessungen kann man den Geschwindigkeitsverlauf solcher Lawinen auf dem Lawinenstrich abschätzen. Diese Daten sind dann sowohl bei der Frage nach dem Standort des Schutzbauwerks, als auch bei dessen Dimensionierung planerisch verwertbar.

Im allgemeinen ist die direkte praktische Bedeutung ermittelter Lawinengeschwindigkeiten jedoch gering. Um so größer muß man den indirekten praktischen Nutzen der Lawinengeschwindigkeitsmessungen veranschlagen: Die im Gelände gesammelten Meßdaten helfen, Modelle und Verfahren zur Reichweiten- und Stoßdruckabschätzung zu erstellen und zu überprüfen.

Auf Seite 3 wurde einleitend eine Bewegungsgleichung vorgestellt. Sie enthielt als Unbekannte den variablen Widerstandskoeffizienten f_i . Mit Hilfe detaillierter Geschwindigkeitsmessungen oder hochgerechneter Geschwindigkeitsverläufe und genauer Lawinenlängsprofilaten ist es über die Bewegungsgleichung (1) möglich, f_i -Verteilungen zu ermitteln. Man kann daraus f_i -Weg-Diagramme ableiten, in denen der Widerstandskoeffizient über dem zurückgelegten Weg aufgetragen ist. Diese Verteilungs-

bilder sind die Grundlage für statistische Modellrechnungen. Dabei wird über Korrelationsanalysen untersucht, ob sich die f_i -Verteilungen aus meß- oder schätzbaren Gelände- und Schneeparametern erklären lassen.

Bislang fehlt für derartige weiterführende Studien allerdings ausreichendes Datenmaterial. Deswegen müssen wir verstärkt versuchen, an niederstürzenden Lawinen Geschwindigkeitsmessungen durchzuführen. Dabei muß das gewonnene Zahlenmaterial durch genaue Lawinenbahn- und Schneedaten ergänzt werden.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung behandelt Methoden der Lawinengeschwindigkeitsmessung im Gelände und rechnerische Verfahren zum Aufbereiten der gemessenen Geschwindigkeitsdaten.

Das Messen und Weiterverarbeiten der Daten erfordert eine klare Bestimmung des Begriffs "Lawinengeschwindigkeit". Wir definieren die "Lawinengeschwindigkeit" als Geschwindigkeitsmittelwert aller Teilchen einer Lawine und grenzen sie gegenüber der Geschwindigkeit einzelner Teilchen oder Massenteile ab. Die Lawinengeschwindigkeit kann nicht gemessen werden. Meßbar sind Geschwindigkeiten von Massenteilen in der Lawine und an der Front. Da ein Großteil der Meßverfahren Frontgeschwindigkeiten liefert, wird auf das Bewegungsverhalten der Front näher eingegangen.

Die Verfahren, mit denen man Geschwindigkeiten an niedergehenden Lawinen ermitteln kann, sind kurz skizziert. Die angewandten Methoden reichen von pauschalen Laufzeitmessungen über die Geschwindigkeitsermittlung auf Bahnabschnitten bis hin zum Erfassen der Geschwindigkeiten, die einzelne Massenteile an bestimmten Bahnpunkten aufweisen. Verfolgt man mit hoher Meßwertfrequenz den Niedergang von Lawinen, so erhält man kontinuierliche Geschwindigkeitsverläufe. Neben der Radarmessung liefert eine Filmmeßtechnik, die im Rahmen der eigenen Forschungsarbeiten entwickelt wurde, solche Geschwindigkeitsverläufe. Die Meßtechnik ist beschrieben. An einem konkreten Beispiel wird aufgezeigt, wie man die Meßdaten auswertet und den detaillierten Geschwindigkeitsverlauf der Frontbewegung einer Lawine ermittelt.

Gemessene Geschwindigkeitsdaten müssen häufig aufbereitet werden, um sie in Modellrechnungen einbringen zu können. Es werden rechnerische Verfahren vorgestellt, mit denen man stark schwankende Geschwindigkeitsverläufe glätten kann. Ferner ist an einem Beispiel ausgeführt, wie der Geschwindigkeitsverlauf einer Lawine aus wenigen abschnittsweise erhobenen Geschwindigkeiten angenähert berechnet werden kann. Mit Hilfe eines konstanten Höhenquotienten kann man auf stetigen Lawinestrichen auch den Geschwindigkeitsverlauf einer niedergegangenen Lawine allein aus der gemessenen Gesamtlaufzeit annähernd nachzeichnen.

7 Summary

Determination of avalanche velocities

The presented paper deals with methods of measuring avalanche velocities in the field and with computing procedures for the data processing of the measured velocities.

Measuring and data processing requires a clear definition of the term 'avalanche velocity'. We define 'avalanche velocity' as the mean value of velocity vectors of all particles of an avalanche. This term has to be differentiated from the velocity of single particles or the velocity of parts of the avalanche mass. The avalanche velocity actually cannot be measured. What we can measure are the velocities of parts of the mass inside and at the front of an avalanche. Since the major part of methods of measurements furnishes front velocities the kinetic characteristics of the front are studied in detail.

Methods to determine the velocities of downhill running avalanches are briefly outlined. The description of applied methods starts with measuring the general running time of an avalanche from its initial point down to the lower limit of its deposition. It is continued by measuring the velocity in single sections of an avalanche track and the determination of velocities of the single mass parts on certain points of the avalanche track. If one observes the downhill course of an avalanche by high frequency of measured values one obtains continuous velocity momenta. Besides measuring these velocity courses by radar, a film technique may be applied, which was developed within the scope of this research work. This technique is described. A concrete example shows how to process the data material and how to determine the detailed course of velocity of the front motion of an avalanche.

In order to use measured velocity data in models they have to be processed frequently. Computing methods are presented, which can be used to smooth out fluctuations in velocity courses. Moreover another example demonstrates how avalanche velocity can be approximated by values gained at single sections of the avalanche path. At steady avalanche paths a so called 'height-quotient-method' also allows to gain an approximation of the velocity course of a downhill running avalanche only by measuring the general total travelling time.

8 Literaturverzeichnis

- ALONSO, M. u. FINN, E.J. 1980: Fundamental University Physics. Vol.I, Addison-Wesley Publishing Company, USA. 538 S.
- ANDREWS, J.G. u. McLONE, R.R. 1976: Mathematical Modelling. Butterworth & Co, London
- ATHEN, H. u. BRUHN, J. 1974: Mathematik zum Nachschlagen. Bertelsmann-Verlag, Gütersloh
- BAGNOLD, R.A. 1954: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proceedings of the Royal Society of London, Ser.A, Vol.225, Nr.1160, S.49-63
- BAKKEHOI, S. u.a. 1981: On the computation of parameters that model snow avalanche motion. Canadian Geotechnical Journal, Vol.18, Nr.1, S.121-130
- BAY.LANDESAMT f.WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg), 1979: Diverse Lehrgangsunterlagen zum Lawinenkurs 1979.
- BON MARDION u.a. 1975: Dynamische Messungen in der Lawine. Experimentierresultate der Winter 73/74. Int.Symp 'Lawinentechniken der Vorbeugungs- und Abwehrsysteme', Aosta 1975, Vortragsmanuskript
- BRIUKHANOV, A.V. u.a. 1966: On some new approaches to the dynamics of snow avalanches. Proceedings to the Int. Conf. of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo. S.1223-1241
- BRIUKHANOV, A.V. 1968: Stereophotogrammetrie terrestre a cadence rapide des avalanches de neige. Societe Francaise de Photogrammetrie, Bull. Nr.29, S.9-28
- BRONSTEIN, I.N. 1971: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch Zürich/Frankfurt, 584 S.
- BRUGNOT, G. 1980: Meßdaten zu den Lawinenuntersuchungen am Col de Lautaret von 1972-78. Schriftliche Mitteilung
- BRUGNOT, G. u. POCHAT, R. 1981: Numerical simulation study of avalanches. Journal of Glaciology, Vol.27, Nr.95, S.77-88
- BUSER, O. u. FRUTIGER, H. 1980: Observed maximum run-out distance of snow avalanches and the determination of the friction coefficients ξ and μ . Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.121-130
- CHENG, T.T. u. PERLA, R. 1979: Numerical computation of avalanche motion. National Hydrology Research Institute, Paper Nr.5
- De BOOR, C. 1978: A practical guide to splines. Springer Verlag, New York, 392 S.
- DENT, J.D. u. LANG, T.E 1980: Modeling of snow flow. Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.131-140

- DeQUERVAIN, M.R.de 1977: Lawinendynamik als Grundlage für die Ausscheidung von Lawinenzonen. Int.Symp. 'INTERPRAEVENT 1975', Innsbruck, Tagungspubl. Bd.2, S.247-267
- EIDG.INSTITUT F.SCHNEE- U.LAWINENFORSCHUNG (Hrsg), 1980: Diverse Lehr- gangsunterlagen zum Lawinenkurs 1980.
- EYBERT-BERARD, A. u.a. 1978: Mesures dynamiques dans l'avalanche. Resultats experimentaux du Col du Lautaret (1972-1978). Deuxieme rencontre internationale sur la neige et les avalanches, Grenoble 1978, S.203-224
- FRANKE, H. 1959: Lexikon der Physik. Francksche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- FRASER, C. 1968: Lawinen - Geißel der Alpen. Verlag A. Müller, Rüs- chlikon/Zürich
- FRAUENFELDER, P. u. HUBER, P. 1963: Einführung in die Physik. Band I. Ernst Reinhardt Verlag Basel. 492 S.
- GAYL, A. 1965: Lawinen. Lehrschrift des Deutschen Alpenvereins, Heft 7, Alpiner Verlag F.Schmitt, 94 S.
- GUBLER, H.U. 1980: Proposal to use CW Doppler Radar to measure velocities of flowing snow avalanches. Interner Bericht der Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station in Zusammenarbeit mit dem Eidg. Institut f. Schnee- u. Lawinenforschung
- GUBLER, H.U. 1981: Messungen von Fließlawinen. Interner Bericht des Eidg.Institutes f. Schnee- u. Lawinenforschung, Nr.600
- HEIMGARTNER, M. 1977: On the flow of avalanching snow. Journal of Gla- ciology, Vol.19, Nr.81, S.357-363
- HERB, H. 1972: Einführung in die Wetter-, Schnee- und Lawinenkunde. Hrsg: Bay.Landesamt f. Wasserwirtschaft, München, 162 S.
- HILDEBRANDT, M. 1982: Beziehungen zwischen den Pauschalgefällen extre- mer bayerischer Lawinen und den Geländeformen der Lawenstriche. Diplomarbeit am Lehrstuhl f. Bodenkunde, Univ. München.
- HOPFINGER, E.J. u. TOCHON-DANGUY, J.-C. 1977: A model study of powder- snow avalanches. Journal of Glaciology, Vol.19, Nr.81, S.343-356
- HRADETZKY, J. 1981: Spline-Funktionen und ihre Anwendung in der forst- lichen Forschung. Forstw.Cbl. 100, S.45-59
- JOETSU = National Road Construction Office, Japan 1971: Report on snow and road on the route 17.
- KÖRNER, H. 1976: Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fließlawinen. Rock Mechanics 8, S.225-256.
- KÖRNER, H. 1977: Flow mechanism and resistance in the debris streams of rock slides. Int. Assoc of Engineering Geology, Bull. Nr.16, S.101-104

- KÖRNER, H. 1980: Modelle zur Berechnung der Bergsturz und Lawinenbewegung. Internat. Symp. "INTERPRAEVENT 1980" Bad Ischl, Tagungspubl. Bd.2, S.15-55. Klagenfurt.
- KOTLYAKOV, V.M. u.a. 1977: The dynamics of avalanching in the Khibins. Journal of Glaciology, Vol.19, Nr.81, S.431-439.
- LAATSCH, W. 1977: Das Berechnen von Lawinengeschwindigkeiten. Forstw.Cbl. 96, S.281-289.
- LAATSCH, W. 1978: Das statistische Ermitteln extremer Reichweiten von Fließlawinen. Mitt. Forstl. Bundes-Versuchsanstalt Wien, H. 125, S. 153-175.
- LAATSCH, W. 1980: Vorschlag zu einer statistischen Berechnung der Reichweiten von Fließlawinen. Int.Symp."INTERPRAEVENT 1980", Bad Ischl, Tagungspubl. Bd.3, S.111-124.
- LAATSCH, W., ZENKE, B., DANKERL, J. 1981: Verfahren zur Reichweiten und Stoßdruckberechnung von Fließlawinen. Forstliche Forschungsberichte München, Nr.47, 129 S.
- LaCHAPELLE, E.R. 1977: Snow avalanches - A review of current research and applications. Journal of Glaciology, Vol.19, Nr.81, S.313-324
- LaCHAPELLE, E.R. u. LANG, T.E. 1980: A comparison of observed and calculated avalanche velocities. Journal of Glaciology, Vol.25, Nr.92, S.309-314
- LANG, T.E. u.a. 1979a: Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow. Part I u. II, Journal of Glaciology, Vol.22, Nr.86, S.107-126.
- LANG, T.E. u.a. 1979b: Numerical simulation of snow avalanche flow. U.S.D.A., Forest Service, Research Paper RM-205
- LEAF, C.F. u. MARTINELLI, M.jr 1977: Avalanche dynamics: engineering applications for land use planning. U.S.D.A., Forest Service, Research Paper RM-183
- LIED, K. u. BAKKEHOI, S. 1979: Empirical calculations of snow avalanche runout distance based on topographic parameters. Norwegian Geotechnical Institute NGI Oslo 8, Report 58302-15.
- MARTINELLI, M.jr. u.a. 1980: Calculations of avalanche friction coefficients from fields data. Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.109-119
- MEARS, A.I. 1980: A fragment-flow model of dry-snow avalanches. Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.152-163
- MELLOR, M. 1979: Dynamics of snow avalanches. In VOIGHT, B.: Rock-slides and Avalanches, Vol.1, Natural Phenomena, Elsevier-Verlag Amsterdam
- MOSTKOW, M.A. 1956: Handbuch der Hydraulik. VEB-Verlag Technik, Berlin 498 S.

- OECHSLIN, M. 1938: Lawinengeschwindigkeiten und Lawinenluftdruck.
Schweizer Zeitschrift f. Forstwesen, S.153-160
- PERLA, R.I. 1981: Avalanche release, motion, and impact.
In COLBECK, S.C.: Dynamics of snow and ice masses. Academic Press,
New York
- PERLA, R., CHENG, T., McCLUNG D. 1980: A two parameter model of snow
motion. Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.197-207
- PERLA, R.I. u. MARTINELLI, M.jr 1976: Avalanche Handbook. U.S.D.A.,
Forest Service, Agriculture Handbook 489
- SALM, B. 1966: Contributions to Avalanche Dynamics. Int.Symp. "Scient.
Aspects of Snow and Ice Avalanches". Davos 1965, IASH-Publ.Nr.69.
- SALM, B. 1982: Lawinenkunde für den Praktiker. Verlag des Schweizer
Alpen Clubs, Wallisellen, 148 S.
- SALWAY, A.A. 1978: A seismic and transducer system for monitoring
velocities and impact pressures of snow avalanches. Arctic and
Alpine Research, Vol.10, No.4, S.769-774
- SCHAERER, P.A. 1973: Observations of snow avalanche impact pressure.
U.S.D.A., Forest Service, General Technical Report, RM-3, S.51-54
- SCHAERER, P.A. 1975: Friction coefficients and speed of flowing
avalanches. Int.Assoc. of Hydrolog. Sciences, Publ. 114, S.425-432
- SCHAERER, P.A. 1981: Bericht über die laufenden Forschungsarbeiten.
Kurznотiz in "ICE"-News Bulletin of the Internat. Glaciological
Society, Nr.65, S.6
- SCHAERER, P.A. u. SALWAY, A.A. 1980: Seismic and impact-pressure
monitoring of flowing avalanches. Journal of Glaciology, Vol.26,
Nr.94, S.179-187
- SCHILD, M. 1972: Lawinen. Lehrmittelverlag des Kantons Zürich. 132 S.
- SCHMIDT, M. 1957: Gerinnehydraulik. Wiesbaden
- SELIGMAN, G. 1936: Snow Structure and Snow Fields. Hrsg. Internat.
Glaciological Society. Neuauflage 1980, 555 S.
- SHIMIZU, H. u.a. 1972: Study of high-speed avalanches in Kurobe Canyon.
Low Temperature Science, Ser A, Nr.30, S.103-114
- SHIMIZU, H. u.a. 1973: Study of high-speed avalanches in Kurobe Canyon.
Low Temperature Science, Ser A, Nr.31, S.179-189
- SHIMIZU, H. u.a. 1974: Study of high-speed avalanches in Kurobe Canyon.
Low Temperature Science, Ser A, Nr.32, S.113-127
- SHIMIZU, H. u.a. 1980: A study on high-speed avalanches in the Kurobe
Canyon, Japan. Journal of Glaciology, Vol.26, Nr.94, S.141-151
- SHODA, M. 1966: An experimental study on dynamics of avalanche snow.
Int. Assoc. of Scientific Hydrology, Publ.Nr.69, S.215-229

- SPÄTH, H. 1968: Ein Verfahren zur flächentreuen Approximation von Treppenfunktionen durch glatte Kurven. Zamm 48, T106-T107
- SPÄTH, H. 1978: Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen. Oldenbourg-Verlag, München. 134 S.
- SPINDLER, A. 1957: Aktiver Lawinendruck und dessen rechnerische Prüfung durch Messungen. Schweizer Bauztg., Jahrg.75, H.42, S.675-678
- STRELE, G. 1950: Grundriß der Wildbach- und Lawinenverbauung. Springer-Verlag Wien, 340 S.
- VAN WIJK, M.C. 1967: Photogrammetry applied to avalanche studies. Journal of Glaciology, Vol.6, Nr.48, S.917-933
- VOELLMY, A. 1955: Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizer. Bauzeitung 73, S.159-165, 212-217, 246-249, 280-285.
- WAKAHAMA, G. 1982: Bericht über laufende Forschungsarbeiten in Japan. in: ICE, News Bulletin of the International Glaciological Society, No.69, S.10/11
- WESTPHAL, W. 1953: Lehrbuch der Physik. Springer-Verlag Berlin. 743 S.
- ZENKE, B., HILDEBRANDT, M. 1983: Vorschlag eines statistisch-graphischen Verfahrens zur Lawinenreichweitenbestimmung auf un stetigen Strichen. Wildbach und Lawinenverbau, 47.Jahrg., Heft 2

A N H A N G

A) Verzeichnis der verwendeten Rechenprogramme

Die Auswertung der kontinuierlichen Laufzeitmessung (Abschnitt 3.4.2) und das Aufbereiten der Geschwindigkeitsdaten (Abschnitt 4) stützt sich auf Computerprogramme. Die verwendeten Programme sind im folgenden aufgelistet. Alle Programme wurden vom Autor dieser Arbeit in der Programmiersprache FORTRAN IV verfaßt. Die Programme stehen am Lehrstuhl für Bodenkunde und Standortslehre der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München zur Verfügung.

Programm- name	Anzahl der Statements	Aufgabe des Programms (in Stichworten)	vgl. Tab/Abb	vgl. Abschnitt
LAWDEZ	81	Überprüfung der Originaldaten, Umformung in Dezimalzahlen	Tab.2	3.4.2.52
LAWKOR	196	Meßwertekorrektur		3.4.2.53
LAWK00	157	Lawinenstrich (tabellarisch)	Tab.3	3.4.2.63
LAWZEI	870	u.a. Lawinenstrichlängsprofil- zeichnung, Geschwindigkeitslinie	Abb.13 Abb.26	3.4.2.63 3.4.2.10
LAWXYZ	176	u.a. Raumkoordinaten der Lawinenstrichpunkte	Tab.4	3.4.2.64
LAWCUT	481	Schnittpunktberechnung zwischen Lawinenstrich und Blick-Kegel	Abb.19 Tab.5	3.4.2.7
LAWV	179	Geschwindigkeitsberechnung, geglätteter Geschwindigkeits- verlauf	Tab.6 Tab.7	3.4.2.8 3.4.2.9
LGRAPH	615	Aufbereitung von Geschwindig- keitsdaten: - Treppenfunktion - Gleitende Mittel - Splineapproximation - Höhenquotientenverfahren	Abb.28 Abb.29 Abb.30 Abb.33	4.2 4.3 4.4 4.5

B) Verzeichnis der Abbildungen

	Seite
Abb.1 Geschwindigkeitsvektoren einzelner Schneebrettschollen als Resultanten von Bewegungskomponenten, die in Fließrichtung und senkrecht dazu wirken	8
Abb.2 Geschwindigkeitszonen im Inneren einer Lawine	10
Abb.3 Schematische Darstellung der pulsierenden Frontbewegung einer Trockenschneelawine	15
Abb.4 Variation der mittleren Frontgeschwindigkeit auf 50 m langen Meßintervallen einer 300 m langen Meßstrecke bei pulsierender Bewegung der Lawinenfront (vgl.dazu Abb.3)	16
Abb.5 Längsprofil eines Lawinenstrichs A ₀ - E' mit der Bahn einer von A ₀ bis E vorgedrungenen Lawine	20
Abb.6 Lawinenstrich am Wendelstein (Bayerische Voralpen)	22
Abb.7 Zuordnungspunkte bei der Beobachtung der Lawinenfrontbewegung	24
Abb.8 Meßlawinenstrich am Tegelberg (Ammergauer Alpen) mit einer Skizze der dort eingebrachten Markierungspfosten	26
Abb.9 Aufnahmeformblatt für die Stoppuhrmessungen am Lawinenstrich "Tegelberg-Brandnerschrofen I" mit den Eintragungen einer Messung vom 11.3.80	27
Abb.10 Schematische Darstellung der Blickrichtungen beim Visieren über einen einzelstehenden Peilpfosten	28
Abb.11 Ausschnitt aus dem Aufnahmeformblatt für die Stoppuhrmessungen am Lawinenstrich "Brauneck-Garland" (Bayerische Voralpen) mit vorgegebenen Peillinien (Blick vom winterlichen Beobachtungsstandpunkt aus)	30
Abb.12 Graphische Darstellung des möglichen Meßfehlers in einem muldenförmigen Lawinenstrichabschnitt beim Visieren über eine Peillinie, deren Markierungen auf seitlichen Geländeerücken angebracht sind	31
Abb.13 Lawinenstrich "Vogelsgern" (Allgäuer Alpen) mit eingezeichneten Peillinien	36
Abb.14 Längsprofil des Lawinenstrichs "Vogelsgern" (vgl.Abb.13). Die stark ausgezogene Linie des unten dargestellten Geschwindigkeitsdiagramms stellt die mittleren Frontgeschwindigkeiten für die einzelnen Teilstrecken dar. Die punktierten Säulen geben die Frontgeschwindigkeit kurz vor und nach dem Durchlaufen der Peillinien an.	38
Abb.15 Schema der Kameraaufstellung für die terrestrisch-photogrammetrische Lawinenbeobachtung (nach BRIUKHANOV 1968, Fig.7)	41
Abb.16 Das Abschätzen der Geschwindigkeiten einzelner Massenteile in einer Lawine aus der Vergleich zweier Druck-Zeit-Diagramme (in Anlehnung an die von SHIMIZU u.a.(1980) durchgeführten Messungen)	45
Abb.17 Vergleich der Druck-Zeit-Diagramme für den dichten und lockeren Fließanteil von Trockenschneelawinen (nach SCHAEERER u. SALWAY, 1980)	48

	Seite
Abb.18 Das Meßprinzip: Punkte im Lawinenhang (G u. D) lassen sich eindeutig bestimmen, wenn der Beobachtungsstandpunkt (B) und die auf die Horizontale bezogenen Blickrichtungswinkel (γ u. δ) bekannt sind.	55
Abb.19 Schema der Schnittpunktberechnung zwischen Kreiskegel und Gerade im dreidimensionalen Raum	57
Abb.20 Das Meßgerät zum Erfassen der fortlaufenden Frontbewegung einer Lawine.	59
Abb.21 Ansichten des Meßgeräts a) Steuerungs- und Aufzeichnungseinheit b) Stativaufsatz mit Kamera und Winkelcodierer c) Meßausrüstung in verpacktem Zustand	60
Abb.22 Schematische Darstellung des Vorgehens beim nachträglichen Korrigieren der Kameraführung	68
Abb.23 Schema der Kartenauswertung zur Darstellung des Lawenstrichlängsprofils	72
Abb.24 Die Geschwindigkeitslinie über einem Teil eines Lawenstrichlängsprofils	85
Abb.25 Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Geschwindigkeitshöhe (a) und daraus resultierende unterschiedliche Schwankungsamplituden in der Diagrammdarstellung (b).	86
Abb.26 Geschwindigkeitslinie der Lawinenfrontbewegung auf dem Lawenstrich "Himmelsschrofen-Christles Bichl" Allgäuer Alpen (gemessen am 20.1.1983)	87
Abb.27 Beispiel einer Messung der Lawinenfrontbewegung (aus BRIUKHANOV 1968, Tab.IIA)	90
Abb.28 Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm des Meßbeispiels aus Abb.27 mit eingepaßter stetiger Ausgleichsfunktion (vgl. Tab.8)	92
Abb.29 Gleitende Mittelwertbildung über je zwei Meßintervalle. Geglätteter Frontgeschwindigkeitsverlauf: -----*----- (vgl.Tab.8 und Abb.28)	94
Abb.30 Glättende Splinefunktion im Vergleich mit der Splinekurve des gemessenen Frontgeschwindigkeitsverlaufs (vgl.Abb.28). gemessen (Zeitintervall: 2 sec) geglättet (Zeitintervall: 4 sec) geglättet (Zeitintervall: 6 sec)	98
Abb.31 Aus 3 Laufzeiten abgeschätzter Geschwindigkeitsverlauf (—) im Vergleich mit dem detailliert abgeschätzten Verlauf der Lawinengeschwindigkeit (-----)	99
Abb.32 Schema der Energieumformung im Reibungsmodell mit konstantem Reibungswiderstand und im Bewegungsmodell mit variablem Bewegungswiderstand	101
Abb.33 Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung des iterativen Höhenquotientenverfahren (—) mit dem vermuteten Lawinengeschwindigkeitsverlauf (-----) im Geschwindigkeits-Zeit- und im Geschwindigkeits-Weg-Diagramm (..... Kurve bei 5 m höher liegendem Anrißpunkt A_u)	104

C) Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tab.1 Definition des Begriffs Lawinengeschwindigkeit	6
Tab.2 Ausschnitt aus dem Datenspeicher mit den im Gelände aufgezeichneten Meßwerten	65
Tab.3 Ausschnitt aus der Liste der abschnittsweise ermittelten Kenndaten eines Lawinenstrichs	74
Tab.4 Ausschnitt aus der Datei mit den dreidimensionalen Koordinaten der einzelnen Lawinenstrichpunkte	76
Tab.5 Ausschnitt aus der Ergebnisliste mit den errechneten Schnittpunkten zwischen den, aus gemessenen Beobachtungs- winkeln abgeleiteten Kreis Kegeln und dem Lawinenstrich	79
Tab.6 Ausschnitt aus der Datenliste mit den errechneten unbereinigten Geschwindigkeiten	81
Tab.7 Ausschnitt aus dem Datensatz mit dem geglätteten Geschwindigkeitsverlauf der Lawinenfront	83
Tab.8 Lawinenbahn- und Zeitdaten des Meßbeispiels aus Abb.27	91
Tab.9 Vergleich der gemessenen Frontgeschwindigkeiten (vgl. Abb.28) mit den vermuteten Lawinengeschwindigkeiten (vgl. Abb.31) zu gleichen Zeitpunkten.	106

Lebenslauf

Am 18. November 1950 wurde ich als Sohn des kaufm. Angestellten Günter Zenke und seiner Ehefrau Theresia, geb. Grill, in Murnau/Obb. geboren. Nach dem Besuch der Volksschule und des mathematisch-naturwissenschaftlichen Gymnasiums in Murnau legte ich im Mai 1970 das Abitur ab.

Von Juni 1970 bis Ende 1971 leistete ich meinen Wehrdienst bei der Gebirgsartillerie in Landsberg/Lech ab. Anschließend nahm ich im Wintersemester 71/72 an der Technischen Universität München das Studium der Mathematik mit Nebenfach Informatik auf. 1974 brach ich das Mathematikstudium ab und wechselte an die Ludwig-Maximilians-Universität München. Dort begann ich im Sommersemester 1974 Forstwissenschaft zu studieren. Die Diplomprüfung legte ich im Wintersemester 77/78 ab. In meiner Diplomarbeit, die ich am Lehrstuhl für Bodenkunde und Standortlehre erstellte, beschäftigte ich mich mit dem Schneegleiten in einem bewaldeten Gebiet der Bayerischen Alpen.

Seit Dez. 1978 arbeite ich an obigem Lehrstuhl an einem Forschungsprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft zum Thema "Wald und Lawinen".

